



**54º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
54º CONGRESSO ESPANHOL DE ACÚSTICA
54th SPANISH CONGRESS ON ACOUSTICS
-TECNIACUSTICA'23-**

**XIII CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
XIII CONGRESSO IBÉRICO DE ACÚSTICA
13th IBERIAN CONGRESS ON ACOUSTICS**

PUBLICACIÓN DEL CONGRESO

ORGANIZAN





8 - 20 OCTUBRE 20 23
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

54º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
54º CONGRESSO ESPANHOL DE ACÚSTICA
54th SPANISH CONGRESS ON ACOUSTICS
-TECNIACUSTICA'23-

XIII CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA
XIII CONGRESSO IBÉRICO DE ACÚSTICA
13th IBERIAN CONGRESS ON ACOUSTICS

Universidad de Castilla-La Mancha
Campus de Cuenca
Escuela Politécnica de Cuenca
C/ Santa Teresa Jornet, 4
16002– Cuenca

Publicación Oficial del Congreso TECNIACUSTICA'23
ISBN: 978-84-87985-33-1
ISSN: 2340-7441 (Versión Digital)
© Copyright: Sociedad Española de Acústica -SEA-

Composición y edición de la publicación: SEA
(María Machimbarrena)

COMITÉS / COMITÉS / COMMITTEES

COMITÉ DEL CONGRESO/ COMITÉ DO CONGRESSO / CONGRESS COMMITTEE

Jorge Patricio (SPA)
Antonio Pedrero González (SEA)
César Sánchez Meléndez (UCLM)

COMITÉ ORGANIZADOR / COMITÉ ORGANIZADOR / ORGANIZING COMMITTEE

Sónia Antunes (SPA)
Miguel Ausejo Prieto (SEA)
Leopoldo Ballarín Marcos (SEA)
José A. Ballesteros Garrido (UCLM)
Ángel Belenguer Martínez (UCLM)
Belén Casla Herguedas (SEA)
Jorge Fradique (SPA)
Marcos D. Fernández Berlanga (UCLM)
Samuel Quintana Gómez (UCLM)
María Machimbarrena Gutiérrez (SEA)
Jaime Ramis Soriano (SEA)

COMITÉ TÉCNICO-CIENTÍFICO

Diogo Alarcão (U. Lisboa)
Jesús Alba Fernández (UPV)
Francesc Alias Pujol (U. Ramón Llull)
Miguel Arana Burgui (U. Navarra)
Cesar Asensio Rivera (UPM)
Luis Antonio Azpicueta Ruiz (UC3M)
Juan Miguel Barrigón Morillas (U. Extremadura)
Nuria Campillo Davo (UMH)
Jesús Carbajo San Martín (U. Alicante)
Teresa Carrascal García (IETcc-CSIC)
Carmen Carro Rejas (ENAC)
Eusébio Conceição (U. Algarve)
Francisco David Denia Guzmán (UPV)
Ana Espinel Valdivieso (Audiotec Ingenieria Acústica)
Víctor Espinosa Roselló (UPV)
Elisabete Freitas (U. Minho)
Valentín Gómez Escobar (U. Extremadura)
Luís Godinho (U. Coimbra)
Ricardo Hernández Molina (U. Cádiz)
Noé Jiménez González (UPV)
Fernando López Santos (Sincosur)
Diogo Mateus (U. Coimbra)
Leticia Martínez Cano (UCLM)
Paulo Amado Mendes (U. Coimbra)
María de los Ángeles Navacerrada Saturio (UPM)
Miguel de Matos Neves (U. Lisboa)
Ramón Peral Orts (UMH)
Isabel Pérez Arjona (UPV) Rubén Picó Vila (UPV)
Pedro Poveda Martínez (U. Alicante)
Francisco Javier Redondo Pastor (UPV)
Jordi Romeu Garbí (UPC)
Diego Pablo Ruíz Padillo (U. Granada)
Roberto San Millán Castillo (URJC)
Manuel Ángel Sobreira Seoane (U. Vigo)
Jerónimo Vida Manzano (U. Granada)

ENTIDADES ORGANIZADORAS / ENTIDADES ORGANIZADORAS / ORGANIZING ENTITIES

Sociedad Española de Acústica
Sociedade Portuguesa de Acústica
Universidad de Castilla-La Mancha



ENTIDADES PATROCINADORAS / ENTIDADES PATROCINADORAS / SPONSORING ENTITIES

Junta de Castilla la Mancha

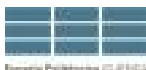


PATROCINIO INSTITUCIONAL / PATROCÍNIO INSTITUCIONAL / INSTITUTIONAL SPONSORSHIP

European Acoustics Association (EAA)
International Commission for Acoustics (ICA)



ENTIDADES COLABORADORAS



EMPRESAS COLABORADORAS / EMPRESAS COLABORADORAS / COLLABORATING COMPANIES



ACTIVIDADES PARALELAS / ACTIVIDADES PARALELAS / PARALLEL ACTIVITIES

Jornada sobre Ruido de Actividades de Ocio

European Symposium on ISABE (International Symposium on Acoustics in Biomedical Engineering)

Mesa redonda: Aplicaciones del procesado de señales sonoras en la sociedad y la industria digital

Reunión Red Cooperación en tecnologías ultrasónicas

Reunión Jóvenes acústicos (YAN)

Encuentro de Jóvenes Acústicos

Concienciación: Paseos Sonoros

SESIONES ESTRUCTURADAS / SESSÕES ESTRUTURADAS / STRUCTURED SESSIONS

AAM. Acústica ambiental. Gestión y control del ruido

AAM-0: Acústica ambiental. gestión y control del ruido

AAM-1 Experiencias sobre CNOSSOS y MER de 4 ronda

AAM-2 Análisis y evaluación del ruido y vibraciones en vehículos silenciosos

AAM-3 Paisajes sonoros urbanos

AAM-4 Ruido y vibraciones en el ambiente laboral

AED. Acústica en la edificación

AED-0 Acústica en la edificación

AED-1 Aislamiento acústico y fuentes de ruido en la edificación

AED-2 Nuevos materiales y dispositivos acústicos

AFS. Acústica Física

AFI-0 Acústica física. Metamateriales

AMS. Acústica musical

AMS-0 Acústica musical

ASA. Acústica submarina Hidroacústica

ASA-0 Acústica submarina Hidroacústica

ASL. Acústica de salas

ASL-0 Acústica de salas

ASL-1 Acústica de recintos históricos

AUD. Audiología

AUD-0 Audiología

ELA. Instrumentación y medidas acústica. Electroacústica

ELA-0 Instrumentación y medidas acústica. Electroacústica

ENA. Enseñanza en acústica

ENA-0 Enseñanza en acústica

MNA. Métodos numéricos en acústica. Acústica computacional

MNA-0 Métodos numéricos en acústica. Acústica computacional

NOR. Normativa y legislación acústica

NOR-0 Normativa y legislación acústica

NOR-1 Revisión RD1367

NOR-2 Aspectos jurídicos de la lucha contra el ruido

PSA. Procesado de señales acústicas

PSA-0 Procesamiento de señales acústicas

PSA-1 Nuevos métodos PSA y Aplicaciones de IA

ULT. Ultrasonidos

ULT-0 Ultrasonidos

VIB. Vibroacústica

VIB-0 Vibroacústica

XCHA Challenge SEA

XCHA-0 Challenge SEA

CONFERENCIAS PLENARIAS/ CONFERÊNCIAS PLENARIAS / PLENARY SESSIONS

CP-01. Paisaje Sonoro y Bienestar Socio-Ecológico en las Ciudades

Dr. Fausto E. Rodríguez Manzo

Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco- MX

CP-02. Buscando el equilibrio del triángulo: acústica, medicina e ingeniería biomédica.

Dr. Raúl Alcaraz Martínez

Universidad de Castilla-La Mancha

CP-03. On the influence of the construction process on the sound insulation of buildings – analysis of case studies in Portugal

Dr. Diogo Mateus

Universidade de Coimbra

COORDINADORES SESIONES ESTRUCTURADAS

Ref.	Sesiones	Cordinadores
AAM	ACÚSTICA AMBIENTAL. GESTIÓN Y CONTROL DEL RUIDO	
AAM-0	Acústica Ambiental. Gestión y control del Ruido	Fernando López Santos,Guillermo Rey Gozalo, Ricardo Hernández Molina
AAM-1	Experiencias sobre CNOSSOS y MER de 4ª ronda	Miguel Ausejo, José Luis Cueto, Fernando López Santos
AAM-2	Análisis y evaluación del ruido y vibraciones en vehículos silenciosos	Nuria Campillo Davó, Ramón Peral Orts, Miguel Arana
AAM-3	Paisajes sonoros urbanos	Elisabete Fraga Freitas , Guillermo Rey Gozalo, Sonia Antunes
AAM-4	Ruido y Vibraciones en el ambiente laboral	Carlos César Rodrigues, Antonio Cubero Atienza , José Enrique Díaz Vázquez, Jorge Fradique
AED	ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN	
AED-0	Acústica en la Edificación	Ana Delgado, Alexander Díaz, Andreia Pereira
AED-1	Aislamiento acústico y fuentes de ruido en la edificación	Teresa Carrascal, Amelia Romero
AED-2	Nuevos materiales y dispositivos acústicos	María Ángeles Navacerrada, Valentín Gómez Escobar, Jesús Alba, Romina del Rey
PSI	PSICOACÚSTICA	
PSI-0	Percepción del confort y la molestia	Marcos D. Fernández Berlanga, Pedro Poveda Martínez, Leticia Martínez Cano
VIB	VIBROACÚSTICA	
VIB-0	Vibroacústica	Eduardo Latorre Iglesias, Robert Arcos, Sergio Anda
AFI	ACÚSTICA FÍSICA	
AF-0	Acústica física. Metamateriales	Paulo Amado Mendes, Rubén Picó, Luis Godinho
AMS	ACÚSTICA MUSICAL	
AMS-0	Acústica Musical	Pedro Poveda Martínez, Vincent Debut, Rubén Picó
MNA	MÉTODOS NUMÉRICOS EN ACÚSTICA. ACÚSTICA COMPUTACIONAL	
MNA-0	Métodos numéricos en acústica. Acústica computacional	Luis Godinho, Robert Arcos, Paulo Amado Mendes
ASA	ACÚSTICA SUBACUÁTICA: HIDROACÚSTICA	
ASA-0	Acústica Submarina: Hidroacústica	Víctor Espinosa, Sergi Jesus, Isabel Pérez Arjona, Jaime Ramis

ASL	ACÚSTICA DE SALAS	
ASL-0	Acústica de Salas	Samuel Quintana, Javier Redondo, Juan Negreira
ASL-1	Acústica de recintos históricos	Alicia Giménez, Lidia Álvarez, Samuel Quintana
ASL-2	Acústica virtual y audio inmersivo	José Javier López, Ricardo San Martín, Juan Jose Gomez Alfageme
AUD	AUDIOLOGÍA	
AUD-0	Audiología	Sheila Templado
ELA	INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS ACÚSTICAS. ELECTROACÚSTICA	
ELA-0	Instrumentación y Medidas Acústicas. Electroacústica	Eugenio García Calderón, Ángel Arenaz
ENA	ENSEÑANZA EN ACÚSTICA	
ENA-0	Enseñanza en Acústica	Ricardo Hernández, Molina Javier Redondo
NOR	NORMATIVA Y LEGISLACIÓN ACÚSTICA	
NOR-0	Normativa y legislación acústica	Carmen Carro, Leopoldo Ballarín, Jorge Patricio
NOR-1	Revisión RD1367	Antonio Pedrero, Miguel Arana, Belén Casla
NOR-2	Aspectos jurídicos de la lucha contra el ruido	Yomara García, Antonio García
ULT	ULTRASONIDOS	
ULT-0	Ultrasonidos	Noé Jiménez, Alejandro Cebrecos, Oscar Martínez
PSA	PROCESAMIENTO DE SEÑALES ACÚSTICAS	
PSA-0	Procesamiento de señales acústicas	Roberto San Millán Castillo , José A. Ballesteros
PSA-1	Nuevos métodos y aplicaciones en el procesamiento de señales acústicas	Luis A. Azpicueta Ruiz, Manuel Sobreira
PSA-2	Aplicaciones de inteligencia artificial a problemas acústicos.	Manuel Sobreira, Roberto San Millán Castillo
CHA	CHALLENGE - RETOS ACÚSTICOS DE LA SEA	
CHA-0	Challenge - Retos Acústicos de la SEA	Miguel Ausejo, César Asensio

JORNADA TÉCNICA SOBRE RUIDO EN ACTIVIDADES DE OCIO

La visión técnica.

Antonio Hidalgo Otamendi.

Profesor de la Universidad de Alicante y gerente de CECOR S.L.

La visión de la Administración.

Sonia Herranz González.

Subdirectora General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ayuntamiento de Madrid

La visión jurídica.

Yomara García Viera.

Presidenta de la Asociación Nacional de Juristas contra el Ruido

La visión del sector empresarial.

Vicente Pizcueta Capuz.

Portavoz de la Federación Nacional de Empresarios de Ocio y Espectáculos (España de Noche)

Mesa redonda

Moderador: Fernando López Santos (SEA).

ISABE (INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ACOUSTICS IN BIOMEDICAL ENGINEERING)

Sesión inaugural: "Buscando el equilibrio del triángulo: acústica, medicina e ingeniería biomédica." Raul Alcaraz Martínez
Catedrático de Universidad UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca

"Análisis de sonidos respiratorios en enfermedades y trastornos respiratorios» Manuel Lozano García
Universidad Politécnica de Cataluña.

"Usando el sonido para la caracterización y estudio de patologías".
Carlos Manuel Travieso González
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

"Análisis de voz, una ventana a la actividad cerebral en el manejo de los trastornos neurodegenerativos". Karmele López de Ipiña.
Universidad de Cambridge / Universidad del País Vasco.

"Imágenes de mapas de dosis protoacústicas para la verificación del alcance de los protones en diagnóstico médico". Joaquín López Herráiz
Universidad Complutense de Madrid

"De la morfología a la función: técnicas avanzadas de imagen por ultrasonidos". Noé Jimenez, "Ramón y Cajal" Researcher at I3M-CSIC
Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (I3M) - UPV Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

"Acústica afectiva: un estudio sobre el impacto de las emociones humanas en la proliferación celular a través de las ondas mecánicas".
David del Rosario Gilabert,
Universidad de Alicante.

FIN DE LA SESIÓN – ISABE Moderador: Raúl Alcaraz Martínez

Debate final con ponentes invitados y clausura de la actividad.



INDICE CONFERENCIAS Y COMUNICACIONES

CONFERENCIAS

COMUNICACIONES



AAM-0 Acústica ambiental, gestión y control del ruido/ 40 Acústica ambiental. Gestao e controlo do ruído.

Numerical Development And Experimental Characterisation Of A Low Height Barrier For Railway Noise Mitigation.	41
João Miguel Lázaro (1), Pedro Alves Costa (1), Luís Cortesão Godinho	
EVOLUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE PAVIMENTOS DE AUTOESTRADAS DA REDE BRISA.	48
Maria Inês Ramos (1), Maria João Rato (1), Rosa Daniela Domingues (1), Maria Margarida Braga (1), Luís Dias Fernandes (1), Elisabete Fraga Freitas (2)	
Espectáculos En Vivo Y La Problemática Del Ruido.	53
Sergio Torrano Díaz	
Análisis Comparativo de Softwares de simulación de ruido ambiental: Comparación entre una solución comercial y una de código abierto.	57
Ignacio Soto Molina (1,2), Miguel Ausejo Prieto (3), Laura Simón Otegui (3), Rosa María Arce Ruiz (2) .	
Estimación de la afección por ruido de carreteras en los espacios de la red Natura 2000 en España, a partir de un modelo de ruido a gran escala.	66
Ignacio Soto Molina (1,2), Rosa María Arce Ruiz (2)	
Diseño De Un Prototipo De Barrera Multifuncional Para Entornos Urbanos.	75
José Ignacio Riesco García (1), Ángel Arenaz Gombau (1), Ana Esther Espinel Valdivieso (1), Diego González Jimenez (1), Francisco Verdugo González (2), José Feroso Domínguez (2)	



Estudios Acústicos Para La Autorización De Proyectos De Aeródromos Y Helipuertos. Criterios De Elaboración Y Calidad.	81
Eva Santos González, Antonio Donoso López, Mirela Vladovic Zupcevic, Nagore Lasa García	
ALEGACIONES A DECLARACIONES ZPAE - ZAS DEBIDO AL OCIO EN AGLOMERACIONES URBANAS.	87
Fernando López Santos	
Influencia De La Altura Del Micrófono En Medidas De Ruido Aeronáutico.	92
Jaime Vargas Calderón, María Jesús Ballesteros Garrido	
Classificação De Fontes De Ruído Industrial Com Técnicas De Mapas De Ruído E Beamforming.	96
Luis Conde Santos	
Caracterización Acústica De Barreras Vegetales.	102
María Dolores Redel Macías, Carlos Castillo Rodríguez, Rafael Pérez Alcántara, Antonio José Cubero Atienza	
ESTUDIO ACÚSTICO POR CAMBIO DE USO DE SUELO EN DOS MUNICIPIOS DE CANTABRIA.	107
Gonzalo Vidal Moltó (1,2), Jose Luis Cueto Ancela (1,2), Isabel Giménez Anaya (1,2), Fernando López Santos (1,2)	
AAM-1 Experiencias sobre CNOSSOS y MER de 4 ronda	113
NOVEDADES METODOLÓGICAS EN EL DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LA INFORMACIÓN APORTADA POR LAS AUTORIDADES COMPETENTES (AACC), ASOCIADA A LOS MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO DE LA CUARTA FASE DE RUIDO.	114
Ramón QUerol Herrá	



AAM-2 Análisis y evaluación del ruido y vibraciones en vehículos silenciosos 119

Estudio Del Espectro De Ruido De Rodadura Y El Perfil Longitudinal En Vías Con Alta Densidad De Tráfico. 120

Víctor Fernández Vázquez, Ángel M. Martínez García-Hoz, Alejandra Gil Abarca, Fernando Terán Sierra,

ESTUDIO DEL CAMPO SONORO INDUCIDO POR GEOMETRÍAS TRIDIMENSIONALES SOBRE UNA SUPERFICIE REFLECTANTE. 125

Sergio Núñez Andrés, Nuria Campillo Davó, Miguel Fabra Rodríguez, David Abellán López, Héctor Campello Vicente, Ramón Peral Orts

Estudio Del Planteamiento De Un Nuevo Procedimiento De Inspección de “sistema De Aviso Acústico De Vehículos” De Vehículos Híbridos Y Eléctricos En ITV. 131

Héctor Campello Vicente, Nuria Campillo Davó, Emilio Velasco Sánchez, Ramon Peral Orts, Miguel Fabra Rodriguez, David Clar Garcia

AAM-3 Paisajes sonoros urbanos 138

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE GRABACIÓN ASEQUIBLES PARA PAISAJES SONOROS. 139

Roberto San Millán-Castillo . (1), Leticia Martínez-Cano . (2), Ignacio López Peñalver (1), Luca Martino . (1)

Paisaje Sonoro Y Bienestar Socio-Ecológico En Las Ciudades. 145

FAUSTO E. Rodriguez Manzo

Resultados Del Paseo Sonoro Con El Método Daumal Para El Tecniacústica 2022. El Paisaje Sonoro De La Dama De Elche. 151

Francesc Daumal Domènech (1), Jerónimo Vida Manzano (2), Miguel Ausejo Prieto (3), Sergio Herguedas Campesino (4)



Relaciones Entre Los Parámetros Psicoacústicos Utilizados Para La Caracterización De Paisajes Sonoros Patrimoniales.	157
Jaume Segura Garcia (1), Salvador Cerda Jordá (2), Miguel Arana Burgui (3), Rosa M ^a Cibrián Ortiz De Anda (1), Alicia Giménez Pérez (4)	
Evaluación Del Paisaje Sonoro Urbano En Elche Conforme Al Protocolo ISO 12913.	163
Jerónimo Vida Manzano (1), Francesc Daumal Domènech (2), Miguel Ausejo Prieto (3), Sergio Herguedas Campesino (4)	
Soundscape Research In VR.	169
Michael M Vorländer, Josep J Llorca-Bofí	
MenorcaEnSons: Una Base De Datos De Paisajes Sonoros Para Investigación Y La Preservación Del Patrimonio Cultural Y Natural.	173
Ignacio Pavón García (1), Roberto San Millán Castillo (2), Marcos Ledesma Barber (1), Manuel Salcedo . (3), Luis Sigcha . (4)	
Paisaje Sonoro En Jardines Botánicos Urbanos.	181
Guillermo Rey Gozalo (1), David Montes González (1), Carlos Iglesias Merchan (2), Juan Miguel Barrigón Morillas (1), Rosendo Vílchez Gómez (1)	
Road Traffic Auralization: Modeling And Synthesis Of Electric Drives	187
Christian G. Dreier, Michael M. Vorländer	
RECONOCIMIENTO DE FUENTES A PARTIR DE MEDIDAS SONOMÉTRICAS PARA EL ANÁLISIS DE PAISAJES SONOROS.	191
Modan Tailleur . (1), Pierre Aumond . (2), Mathieu Lagrange . (1), Vincent Tourre . (3)	
AMM-4 Ruido y vibraciones en el ambiente laboral	195
Aplicaciones De Los Sensores Inerciales De Relojes Inteligentes En PRL Y Salud	196
Ignacio Pavón García, Carlos Polvorinos Fernández, César Asensio Rivera, Juan Manuel López Navarro, Héctor García Palencia, Guillermo De Arcas Castro	



AED-0 Acústica en la edificación

202

Laboratory Measurements Of Lightweight Floating Floor Systems On Cross-Laminated Timber (CLT) Slabs

203

Paulo Almeida Pinto (1), Marina Inês Rodrigues (2), Iñigo Arana Goenaga (3)

Medición De Parámetros Mecánicos De Nuevos Eco-Materiales Para Modelos De Predicción De Aislamiento Acústico A Ruido Aéreo .

209

Romina Del Rey Tormos, Jesús Alba Fernández, Victor Atienza Soler

Evolución En El Aislamiento Acústico De Las Ventanas Utilizadas En Viviendas.

214

Susana Lopez De Aretxaga Escudero

DISEÑO DE CUBIERTAS METÁLICAS EN RECINTOS DEPORTIVOS

220

Alexander Díaz Chyla

Medición De Aislamiento Acústico En Condiciones Comparables De Laboratorio De Ventanas De Diseño Tradicional Y Ventanas De Estructura Metamaterial.

224

Dulce Rosario Ponce Patrón (1,2), Felipe Orduña Bustamante (3), Santiago Jesús Pérez Ruiz (3), Ricardo Dorantes Escamilla (3), Antonio Bautista kuri (1), Antonio Pérez López (3)

SGAcustic. Software Para El Cálculo Teórico Del Aislamiento Acústico, Comprobación Del DB HR Y Pre-Calificación Acústica De Los Edificios.

232

Penélope González De La Peña, Nicolás Bermejo Presa

El Comportamiento Acústico De Los Vidrios En Edificación.

237

Penélope González De La Peña, Fernando De La Rubia Jimenez

Caracterização Do Ruído No Interior E Na Envolvente De Campos De Padel – Casos De Estudo .

243

Diogo Rosa Mateo



Avaliação Do Isolamento Acústico De Divisórias Compostas Por Painéis De Aglomerado De Madeira. 249

Andreia Carvalho Pereira, Diogo Rosa Mateus, Luís Cortesão Godinho

In situ performance variability of acoustic doors and comparative analysis between the measured results and theoretical estimates. 255

Rui Miguel Sá Ribeiro

AED-1 Aislamiento acústico y fuentes de ruido en la edificación 260

La Influencia de la baja frecuencia del aislamiento acústico de ventanas en la molestia percibida frente a estímulos urbanos 261

Daniel de la Prida, María Ángeles Navacerrada, Antonio Pedrero, Luis A. Azpicueta-Ruiz, David Caballo

Corrección Por Tiempo De Reverberación En La Evaluación De Los Valores De Inmisión De Ruido – Comparativa Entre Diferentes Métodos. 267

Teresa Carrascal García, Belén Casla Herguedas, Amelia Romero Fernández

ESTUDO DE CASOS PRÁTICOS DE MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO DE FACHADAS. 273

Jorge Célio Fradique (1), Helder Gonçalves Martins (2), Marco Antunes Mateus (2)

Transmisión de ruido y vibraciones vía estructura del edificio: Posibles soluciones. 280

Juan Negreira, Alfonso Corz



Airtightness /Airborne Sound Insulation study in accredited sound insulation facilities .

285

Ahmed Mohamed Ibrahim Elsaedi, Alberto José Meiss Rodríguez, Irene Poza Casado, Miguel Angel Padilla Marcos, María Machimbarrena

AED-2 Nuevos materiales y dispositivos acústicos

291

Pistola De Impedancia Para La Detección De Lesiones En Materiales Pétreos .

292

María Ángeles Navacerrada Saturio (1), María Peña . (2), Raquel Fort . (2), María Del Mar Barbero-Barrera . (3), Daniel De La Prida . (4), Tomás simón Gómez (5)

Estudio De Prototipos Acústicos Basados En Residuos De Tapones De Plástico .

298

Romina Del Rey Tormos (1), Jose Enrique Crespo Amorós (2), Joan Escalles Tur (1), Jesús Alba Fernández (1)

Dispositivo Electroacústico Para La Medida De La Porosidad De Materiales Porosos.

303

JESUS Alba Fernandez (1), Juan Carlos Rodriguez Vercher (2), Rodolfo Gustavo Venegas Castillo (3), Jorge Patricio Arenas Nermudez (3)

Obtención De La Porosidad, Longitud Característica Térmica Y Permeabilidad Térmica Estática De Materiales Porosos.

308

JESUS Alba Fernandez (1), Juan Carlos Rodriguez Vercher (1), Romina Del Rey Tormos (1), Jorge Patricio Arenas Bermudez (2)

Estudios Sobre La Influencia Del Espesor En La Frecuencia Máxima De Absorción De Absorbentes Porosos.

313

Celia Moreno González, Valentín Gómez Escobar, Guillermo Rey Gozalo



- In-Situ Acoustic Characterization Of Porous Materials With A PU-Probe.** 319
Marco Antonio Ribera Tejeda (1), Paulo Amado Mendes (1), Rui Sá Ribeiro (2), Pedro Teixeira Pinto (2)
- Sound absorption properties of mycelium based materials with textile waste: an exploratory study.** 326
Luis Miguel Julio (1), Tomás Simón Gómez (2), María Del Pilar Rivera (1), Juan Camilo Oviedo (1), Christ Glorieux . (2), Nelson Escobar . (1)
- Evaluación acústica de paneles fabricados con hojas de olivo aglomerados con matriz polimérica.** 331
Isaac Montava Belda, Jorge G. Segura Alcaraz, Ernesto Juliá Sanchis, José María Gadea Borrel

AFI-0 Acústica física. Metamateriales 335

- Dispositivo De Filtrado Sintonizable Basado En Cristal De Sonido Multiresonante.** 336
David Ramírez Solana (1,2), Jaime Galiana Nieves (3), Javier Redondo Pastor (3), Rubén Picó Vila (3), Agostino Marcello Mangini . (1), Maria Pia Fanti . (1)
- In-Duct Broadband Dissipation Using Micro-Capillary Plates .** 340
Teresa Bravo María (1), Cedric Maury Maury (2)
- Phononic Lattices With Time-Varying Parameters .** 348
Nathan Zwahlen (1,2), Javier Redondo Pastor (3), Victor Sánchez Morcillo (3), Rubén Pico Vila (3).



- Tendencias En El Uso De Metamateriales En Acústica Aplicada: Ejemplos En Acústica De Edificios, Acústica De Salas Y Electroacústica.** 352
Vicente Cutanda Henríquez
- Numerical Study Of Optimized Multilayered Sound Absorbent Solutions For Railway Noise Mitigation.** 357
Laura Lourenço Sousa, Luís Cortesão Godinho, Paulo Amado Mendes
- Numerical Study of Symmetric hexagonal ascoustic metasurface for sound transmission loss under normal incidence** 363
Denilson Del-Teo Ramos (1), Luís Cortesão Godinho, Paulo Amado Mendes (1), Paulo Henrique Mareze (2)
- AMS-0 Acústica musical** 369
- Análisis Vibratorio De Violines Para Estimar Su Precio Basado En Técnicas De Machine Learning .** 370
Isabel Villa Ruiz (1), Leticia Martínez Cano (2), Roberto San Millán Castillo (1)
- Free-Field Acoustic Radiation Modes Of Unbaffled Plates Using A Minimal Set Of Elementary Sound Sources .** 376
Filipe Da Cruz Soares (1), Vincent Debut Debut (2)
- FEM-Based Optimal Design For The Tuning Of Sixxen Instruments.** 382
Debut Vincent Georges Mickael (1), Borges Rui Maia (2), Carneiro Pedro Pedro (2)
- Vibration And Acoustic Radiation Of A Guitar With Coupled Front And Back By A Soundpost.** 388
Elena Torres Emparan , Paulo Vaz Carvalho , Rubén Picó Vila , Vincent Debut



ASA-0 Acústica submarina Hidroacústica

394

Efecto Del Movimiento Del Agua En Tanques Sobre Las Señales Hidrofónicas.

395

Ruben Fraile Muñoz, Sara Pérez Rodríguez, Gianna Arencibia Castellanos, Juana María Gutiérrez Arriola, María Castillo Moral

Análisis Y Caracterización De Los Ruidos Propios De Un Glider Subacuático Para Aplicaciones De Monitorización De Ruido Ambiental Según La Directiva 2008/56/EC (MSFD) .

401

Andrés Felipe Alfonso Alfonso (1), Neus Pérez Gimeno (2), Sergio Morell Monzó (1), Isabel Pérez Arjona (1), Víctor Espinoza Roselló (1)

ANALYSIS OF THE UNDERWATER SOUNDSCAPE USING ECOACOUSTIC INDICES: THEORETICAL COMPILATION OF ECOACOUSTIC PARAMETERS.

408

Nerea Bautista Parra, Pedro Poveda Martínez, Alice Affatati ., Jesús Carbajo San Martín, Jaime Ramis Soriano

A Preliminary Study On The Particle Motion Of Underwater Sound Sources .

413

J. Carbajo, P. Poveda, F. Arias, I. Pérez, V. Espinosa, M. Cianferra, U. Tinivella, J. Ramis

ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE EL RUIDO EN TANQUES DE REPRODUCCIÓN DEL ATÚN ROJO.

418

PEDRO Poveda Martínez, JAIME Ramis Soriano, Jesús Carbajo San Martín

Diseño y caracterización de un altavoz submarino .

426

José Martínez Iranzo, Jesús Carbajo San Martín, Pedro Poveda Martínez, Jaime Ramis Soriano



- Primeros pasos en el diseño de sistema radiante del tipo DML para acústica submarina.** 431
Pedro Poveda Martínez, Jesús Carbajo San Martín, José Martínez Iranzo, Enrique G. Segovia Eulogio, Jaime Ramis Soriano
- Comparación de señales de banda ancha para posicionamiento acústico submarino.** 437
Álvaro Lloret Gaona, Víctor Espinosa Roselló, Carlos David Llorens Álvarez
- CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y SÍSMICAS RADIADAS POR CRUCEROS EN EL MAR MEDITERRÁNEO.** 442
Esther Moya De Rivas, Francisco Javier Rodrigo Saura, Antonio Sánchez García, Pablo Cervantes Fructuoso
- ELABORACIÓN DE PAISAJES SONOROS PARA LA MONITORIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA .** 448
Francisco Javier Rodrigo Saura (1), Jaime Ramis Soriano (2), Eduardo Ruiz Perez (1), Pedro Poveda Martínez (2)
- ANALYSIS OF THE UNDERWATER SOUNDSCAPE USING ECOACOUSTIC INDICES: ACOUSTIC STUDY OF UNDERWATER AREAS IN THE MEDITERRANEAN SEA.** 454
Nerea Bautista Parra, Pedro Martínez Poveda, Alice Affatati ., Jesús Carbajo San Martín, Jaime Ramis Soriano
- DETECCIÓN DE SILBIDOS DE MAMÍFEROS MARINOS EN ESPECTROGRAMAS UTILIZANDO YOLO-V5.** 460
Sergio Morell Monzó
- CONSIDERACIONES SOBRE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LOS TANQUES PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DEL RUIDO SOBRE LOS PECES.** 466
Jaime Ramis Soriano



ASL-0 Acústica de salas

471

472

La Semana De Música Religiosa De Cuenca (1962-2023): Importancia, Repertorio Y Acústica De Los Espacios.

Marco Antonio De La Ossa Martínez

Estudio Acústico Del Auditorio Del Conservatorio Profesional De Música “Pedro Aranaz” De Cuenca .

Abel Segura López, Samuel Quintana Gómez, Marcos David
Fernández Berlanga

478

Simulación Y Validación Del Diseño Acústico De Un Recinto Eclesiástico Como Espacio Multiusos. La Iglesia De San Julián En Cuenca (España).

Sergio Rubio Luque, Samuel Quintana Gómez, José Antonio
Ballesteros Garrido

484

REFLEXIONES SOBRE LA EVALUACIÓN ACÚSTICA EN ESTADIOS Y GRANDES RECINTOS MULTIPROPÓSITO.

Mario Torices Fernández, Esperanza Sánchez Romero, Mariene
Benutti Giunta

491



ASL-1 Acústica de recintos históricos

496

Contraste Metodológico E Instrumental Para La Interrelación Entre Formatos Ambisonics Y La Norma ISO-3382: Aplicación En La Acústica De Recintos Históricos Singulares.

497

José Benjamín González Gomis (1), Samuel Quintana Gómez (2)

LA ACÚSTICA DE LOS REALES TEATROS DE CARLOS III: EL ESCORIAL Y ARANJUEZ.

504

Juan José Gómez Alfageme, Clara Arribas Bonilla, María Alonso García, Irene Sánchez Gass

Modelo Acústico De La Basílica Del Real Monasterio De San Lorenzo Del Escorial.

510

María Larrosa Navarro (1), Antonio Pedrero González (1), Daniel De La Prida Caballero (2)

Recuperación Acústica Del Teatro Del Seminario Del Monasterio De San Lorenzo Del Escorial .

516

María Larrosa Navarro (1), Antonio Pedrero González (1), Daniel De La Prida Caballero (2)

Acústica De Recintos Prehistóricos: Estudio Arqueoacústico De Palomas I.

522

Lidia Álvarez Morales (1,2), Neemias Santos Da Rosa (1,2), Daniel Benítez Aragón (1), María Lazarich González (3), Margarita Díaz-Andreu García (1,2,4)

Caracterización Acústica De Los Jameos Del Agua – Lanzarote.

528

Manuel Medina Molina



AUD-0 Audiología

533

SISTEMA PARA LA MEJORA DEL CONFORT ACÚSTICO EN LAS INCUBADORAS NEONATALES (NICA+): RESULTADOS PRELIMINARES DEL PROTOTIPO.

534

Ricardo Hernández Molina, Francisco Fernández Zacarías. Virginia Puyana Romero, Juan Luis Beira Jiménez, Arturo Morgado Estévez

EL IMPACTO DEL RUIDO EN EL SISTEMA AUDITIVO. SINAPTOPATÍA COCLEAR EN EL PACIENTE DE TINNITUS.

542

Sheila Templado (1), Luis Miguel Amorós (2), María Teresa Almela Rojo (2), Guillermo Savio (3), Francisco García-Purriños (4)

ELA-0 Instrumentación y medidas acústica. Electroacústica

553

Mediciones En Campo Cercano De Ruido Al Paso De Unidades Ferroviarias De Alta Velocidad: Posibilidades Y Retos.

554

Jaume Solé Bosquet

Accuracy And Performance Tests Of A Wireless Georeferenced Noise Sensor For Mobile Noise Sampling.

559

Guillermo Quintero Perez, Andreu Balastegui Manso, Jordi Romeu Garbi

ENA-0 Enseñanza en acústica

566

Experiencia De Fabricación, Montaje, Puesta En Marcha Y Utilización De Una Instalación De Laboratorio Acorde A La Norma UNE-EN ISO 16251-1.

567

David Caballol Bartolomé (1), Patricia Salso Aránguez (2), Maria De Los Angeles Navacerrada Saturio (3), Daniel De La Prida Caballero (3), Antonio Pedrero Gonzalez (3)



- La Necesidad De Generar Campañas De Información Y Herramientas Para Niños De Educación Básica En La Ciudad De México Respecto Al Ruido Ambiental Y Sus Efectos .** 573
Elisa Garay Vargas, Laura Angélica Lancón Rivera, Dulce Rosario Ponce Patrón
- MNA-0 Métodos numéricos en acústica. Acústica computacional** 580
- A Comparison Of Acoustic Solvers For FT Ultrasonic Wind Sensors .** 581
Antonio Jimenez Garcia, Ganesh Chandrasen Diwan
- Vibration And Radiated Noise Computation From Railway Systems Using A BEM Methodology .** 587
Antonio Romero Ordóñez, Rocío Velázquez Mata, Pedro Glavín Barrera
- Aeroacoustics Simulation Of Talgo’s Running Gear Frame “Rodal” .** 591
Ana Alvés Vieira
- La Entropía Shannon Aplicada A La Acústica: Estudio Del Efecto Zener Acústico .** 598
José Sánchez Dehesa.
- SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EFECTO DEL AMORTIGUAMIENTO DE LA MEMBRANA TIMPÁNICA HUMANA SOBRE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL OÍDO MEDIO.** 601
Luis Caminos Gámez, Antonia Lima Rodriguez, José Garcia-Manrique Ocaña, Antonio Gonzalez Herrera
- Computational Fluid Dynamics Application To Predict Rocket Launch Noise.** 607
Mara Salut Escartí Guillem (1,2), Sergio Hoyas Calvo (3), Lluís Miquel García Raffi (3)



- Homogeneización De Un Recubrimiento De Resonadores Mediante Elementos Finitos .** 613
Francisco Simón Hidalgo (1), Marcos Chimeno Manguán (2), Pedro Cobo Parra (1)
- Sistemas Acústicos Unidimensionales Con Condiciones De Contorno Moduladas Temporalmente.** 617
Jaime Galiana Nieves (1), Javier Redondo Pastor (2), Víctor José Sánchez Morcillo (2), Rubén Picó Vila (2)
- On The Calculation Of Transmissibility Functions For Vibro-Acoustic Finite Element Models.** 624
Duarte Miguel Salvado Pereira (1), Miguel Matos Neves (2), Nuno Manuel Mendes Maia (2), Hugo Filipe Diniz Policarpo (3,2)
- Iterative Coupling Of Acoustic-Poroelastic Problems In Finite And Infinite Domains.** 630
Kleber De Almeida Gonçalves (1), Luis Manuel Godinho (1), Pedro Alves Costa (2)
- Prediction of the sound absorption of porous concrete using machine learning approaches .** 637
Luis Pereira . (1,2), Fernando Branco . (1,2), Paula Da Venda Oliveira (1,2), Luís Godinho . (1,2)

NOR-0 Normativa y legislación acústica 643

- Criterios De Inteligibilidad En Los Sistemas De Alarma Y Evacuación Por Voz .** 644
Juan Manuel Díaz Contreras, Pablo Vaquera Bermúdez



NOR-1 Revisión RD1367

650

Propuestas Para La Revisión Del RD 1367/2007 En El ámbito De La Acústica De La Edificación. Coordinación Con El DB-HR Del CTE.

651

Amelia Romero Fernández, Belén Casla Herguedas, Teresa Carrascal García

Disfunciones En La Penalización Por Tonalidad En El RD 1367/2007.

663

Miguel Arana Burgui, Ana Valencia Leoz, Ruben Eguinoa Cabrito, Ricardo San Martín Murugarren

Evaluación Y Límites De Ruido Para Actividades Industriales Fuera Del Casco Urbano .

669

Rocío Perera Martín, Teresa Rodríguez Sánchez

RETOS METOLÓGICOS DE LA MODIFICACIÓN DEL REAL DECRETO 1367/2007 EN MEDIDAS DE RUIDO AMBIENTAL.

672

Juan José Climent Ballester, José Alberto Trujillo Gallego, Antonio Martínez Calderat, Rocío Perera Martín, Ángel Arenaz Gombau

RD 1367/2007 – Estudio de los requisitos de capacidad técnica y solvencia.

678

Carmen Carro Rejas

ISO 1996 Y RD 1367/2007. Una Confluencia Necesaria.

Antonio Pedrero González



NOR-2 Aspectos jurídicos de la lucha contra el ruido 683

“El Problema Del Ruido Procedente De Los Locales De Ocio Nocturno Y De Las Aglomeraciones. El Caso De La C/ Trasalfódiga De Toro (Zamora)”. 684
MARIA JOSÉ Rodríguez Domínguez

EL REGIMEN JURIDICO DE LAS ACTIVIDADES RUIDOSAS ANTERIORES A LA LEY 37/2003, DEL RUIDO. 690
Agustín Bocos Muñoz

El Ruido Procedente De Terrazas Y Veladores. 694
Maria Dolores Muñoz Perales

FIESTAS POPULARES. Análisis De La Sentencia De 18 De Mayo De 2023 Se La Sección Segunda Del TSJ Canarias Sobre El Carnaval De Día De Vegueta. 702
María Yomara García Viera

El ruido y la jurisdicción penal . 709
Ricardo Ayala Martínez

PSA-0 Procesamiento de señales acústicas 713

Comportamiento De Los Amplificadores Bajo Diferentes Señales De Entrada. 714
Alberto Fueyo Gallego

Sistemas De Megafonía, Inteligibilidad, STI Y Señales De Verificación. 719
Alberto Fueyo Gallego

Caracterización De Fuentes De Ruido Y Vibraciones De Máquina Enfriadora Industrial . 723
Amadeu Segura Torres, Pere Vicenç Rodríguez Sorribes



PSA-1 Nuevos métodos PSA y Aplicaciones de IA

728

Detección Automática De Goteos A Partir De Modelos Sintéticos De Su Huella Acústica.

729

Manuel A.Sobreira Seoane

A Comparative Study of Neural Models for Emotional Voice Conversion.

735

Clara Luzón Álvarez (1,2), Maximo Cobos Serrano (1), Christian Antoñanzas Manuel (2)

Foley-VAE: Generación De Efectos De Audio Para Cine Con Inteligencia Artificial.

743

Mateo José Cámara Largo, José Luis Blanco Murillo

Impacto Del Preprocesamiento En La Clasificación De La Elevación De Señales HRTF En Múltiples Conjuntos De Datos .

751

Juan Antonio De Rus Arance (1), Mario Montagud Climent (1,2), Jesus López Ballester (1), Francesc Josep Ferri Rabasa (1), José Javier López Monfort (3), Máximo Cobos Serrano (1)

Optimização De Híper-Parâmetros Para Classificadores De Sons Impulsivos.

760

André Silva Mendes, Paulo Trigo Silva, Joel Preto Paulo

MEJORAS EN LA DETECCIÓN DE EVENTOS ACÚSTICOS MEDIANTE LA PONDERACIÓN DE DESEQUILIBRIO DE ACTIVIDAD Y PREDICCIONES DÉBILES BASADAS EN EL MÁXIMO.

766

Carlos Mauricio Castorena Lara, Maximo Cobos Serrano, Francesc Josep Ferri Rabasa

Audio-To-Score Alignment System To Synchronize Medieval Chant Recordings.

770

Pablo Cabañas Molero (1), Raquel Cortina Parajón (2), Jaime Garcia Martínez (1), Elías F-Combarro Álvarez (3), Pedro Vera Candeas (1)



Quantum Support Vector Machines In Cardiac Sound Analysis: Evaluating Performance With Signal Representation.	774
Antonio J. Muñoz Montoro (1), Pablo Revuelta Sanz (2), Juan De La Torre Cruz (3), Francisco J. Cañadas Quesada (3), Jose Ranilla Pastor	
Modelado De Respuestas Al Impulso De Salas Mediante Redes Neuronales Profundas .	778
Gonzalo Atienza Selva, Francisco Pastor Naranjo, Valery Naranjo Ornedo, Gema Piñero Sipán	
Reconocimiento De Emociones A Través De La Señal De Voz.	784
Lorena Álvarez Pérez (1), Álvaro Callejas Ramos (1), Fernando Blanco Albendea (2)	
Clasificación De Sonidos En El Exterior De Vehículos Mediante Inteligencia Artificial.	790
Lucas Banchemo Martínez (1), Francisco Vacalebri Lloret (1), Jose Javier López Monfort (1), Jose Manuel Mossi García (2)	
IA Para El Mantenimiento Predictivo En Canteras: Modelado .	796
Virginia Yagüe Jiménez, Mateo José Cámara Largo, Fernando Marcos Macías, Rodrigo Moreno Tamaki, José Luis Blanco Murillo	
Design Of A Noise-Selective Sound Seat Combining Auditory Scene Analysis And Active Sound Field Techniques .	806
Alberto González Salvador (1), Manuel Rosa Zurera (2), María De Diego Antón (1), Roberto Gil Pita (2), Miguel Ferrer Contreras (1), Manuel Utrilla Manso (2)	
Desarrollo De Sensores Inteligentes Basados En Fenómenos Vibro-Acústicos.	812
Cesar Asensio Rivera, Ignacio Pavón García, Juan Manuel López Navarro, Guillermo De Arcas Castro	
Acústica Y Neurociencia. Aplicaciones En El Campo De Las Enfermedades Neurodegenerativas.	817
Cesar Asensio Rivera, Ignacio Pavón García, Juan Manuel López Navarro, Daniel González Nieto, Guillermo De Arcas Castro	



- Del Visual Al Auditivo: Sonorización De Escenas Guiada Por Imagen.** 823
María Sánchez Ruiz (1), Laura Fernández Galindo (1), Mateo José Cámara Largo (1), Julián Arias Londoño (1), Giulia Comini Comini (2), Adam Gabrys Gabrys (3), José Luis Blanco Murillo (1), Juan Ignacio Godino Llorente (1), Luis Alfonso Hernández Gómez (1)
- Acoustic Localization Of UAVs With Microphone Arrays. Comparison Of Different Array Geometries.** 833
Manuel Rosa Zurera, Diana Tejera Berengué, FangFang Zhu Zhou, Manuel Utrilla Manso, Roberto Gil Pita
- Uso De Redes Neuronales Basadas En Mecanismos De Atención Para El Modelado De La Respuesta Acústica De Salas.** 839
Jose Ignacio Ortiz Canepa (1), Ignacio Martin Salinas (1), Jose Antonio Belloch Rodríguez (1), Gema Piñero Sipán (2)
- Projeto MIRA - Desenvolvimento De Uma Plataforma Inteligente De Monitorização De Ruído Ambiental.** 845
Luis Conde Santos
- Evaluación De Un Sistema De Zonas De Sonido Personales Realizado Con Dispositivos Multimedia De Bajo Coste.** 851
Mathys Daniel D (1), Daniel de la Prida Caballero (2), Laura Fuster Criado (3), Guema Piñero Sipán (3), Luis Azpicueta Ruiz (2)
- ULT-0 Ultrasonidos** 857
- Líquidos Viscoelásticos Como Filtros Paso Banda En La Propagación De Ondas De Cizalla.** 858
Jorge Torres Perez (1), Gabrielle Laloy-Borgna - (2), Guillermo Rus Carlborg (1), Stefan Catheline - (2)
- Viscosity And Nonlinear Elastography Will Be The Next Generation Biomarkers In Clinical Diagnosis .** 862
Guillermo Rus Carlborg



- Transurethral Shear Wave Elastography (TUSWE): A New Concept For Imaging Prostate Cancer .** 865
Antonio Jesús Gómez Fernández (1,2), Guillermo Rus Carlborg (1), Nader Saffari . (2)
- Assessment Of Pleura Sliding In Lung Echography By Speckle Tracking .** 868
Mario Muñoz Prieto, Guillermo Cosarinsky Markman, Jorge Fernández Cruza, Jorge Camacho Sosa-Dias
- Skin Cancer Diagnosis Using Torsional Wave Elastography: A New Approach.** 872
Hirad Shamimi Noori (1,2), Inas H Faris (1,2), Jose Luis Martin Rodriguez (3), Guillermo Rus Carlborg (1,2,4)
- Monitoring Physicochemical Properties In Lasagna Pasta Using Contactless Ultrasound.** 876
Virginia Sanchez Jimenez (1), Anabella S. Giacomozzi (1), Javier Serrano Gutierrez (1), Jorge Gosalbez Castillo (2), Jose Benedito Fort (1), Jose Vicente Garcia Perez (1)
- Airborne Ultrasonic Inspection Of Packaged Jellies.** 881
Anabella S. Giacomozzi (1), Virginia Sanchez Jimenez (1), Maria Callejo Signes (2), Jose Benedito Fort (1), Jose Vicente Garcia Perez (1), Jorge Gosalbez Castillo (3)
- Conformador De Imagen Ultrasónica Basado En Redes Neuronales.** 887
Óscar Martínez Graullera, Carolina Bertoncini Fernández, Alberto Ibañez Rodríguez, Luis Elvira Segura, Montserrat Parrilla Romero
- Mejora De La Profundidad De Foco Sistemas De Un Sistema De Imagen Ultrasónica Monotransductor Mediante Técnicas De Apertura Sintética.** 891
Óscar Martínez Graullera, Alberto Ibañez Rodríguez, Luis Elvira Segura, Carmen Duran Gómez,
- Improving SNR And Bandwidth Of Shear-Wave Displacements Via Modulated Force Excitation.** 895
Enrique González Mateo, Francisco Camarena Femenía, Noé Jiménez González



- Caracterización Ultrasónica De Las Constantes Ortotrópicas Elásticas De Materiales De Impresión 3D.** 899
Josep Rodríguez Sendra (1), Alicia Carrión Garcia (1), Francisco Camarena Femenía
- Evaluación De Algoritmos Basados En La Respuesta Al Impulso Espacial Del Transductor Para Mejorar El Rendimiento De Un Microscopio Fotoacústico Con Escaneo Láser Rápido.** 903
Javier Ángel Navarro Calvo, Alejandro Cebrecos Ruiz, Juan José García Garrigós, Francisco Camarena Femenía
- An Approach To Modeling The Ultrasonic Signal Response Of Wave Propagation In A Water-Immersed Plate.** 911
Mounir . Tafkirte, Adil . Hamine, Hicham . Mesbah, Mohamed . Ettahiri
- Imagen Fotoacústica Empleando Nanopartículas De Redes Orgánicas Covalentes (NCOFs) Como Agente De Contraste .** 916
Irene Pi Martín (1), Carla María vidaurre Agut (2), Juan José García Garrigós (1), Alejandro Cebrecos Ruiz (1), Noé Jiménez González (1), Pablo Botella Asunción (2), Francisco Camarena Femenía (1)
- Reflectores Helicoidales Para La Focalización De Vórtices Acústicos De Alta Intensidad.** 920
Noé Jiménez González, Enrique Manuel González Mateo, Francisco Camarena
- Verificación De Tratamientos De Protonterapia Mediante Protoacústica Y Redes Neuronales.** 926
Joaquin Lopez Herraiz, Clara Freijo Escudero, Javier García Muñoz, Maily Perez Liva, Daniel Sanchez Parcerisa, Jose Manuel Udias Moinelo



VIB-0 Vibroacústica

929

3D Hybrid Method For Assessing Re-Radiated Noise Induced By Railway Traffic: Numerical Validation. 930

Paulo Jorge Soares (1), Pedro Alves Costa (1), Robert Villamarin Arcos (2), Aires Silva Colaço (1), Luís Cortesão Godinho (3)

Prediction Of Ground-Borne Vibrations Induced By Railway Traffic Based On Machine Learning Techniques. 936

Aires Manuel Colaço, Ana Luísa Ramos, Pedro Alves Costa

Avaliação Da Componente Vibração Em Estudos De Impacte Ambiental Para Projetos De Vias-Férreas Em Zonas Urbanas: Atualização De Aspetos Metodológicos E Práticas Correntes Em Portugal . 940

Sónia Monteiro Antunes, Jorge Viçoso Patrício

Performance Of The Building Base Isolation : The Two-Level Approach. 949

Iñigo Arana Goenaga (1), Albert Isnardo Iglesias (2), Amadeu Segura Torres (2), Pere Vicenç Rodríguez Sorribes (2), Hamid Masoumi - (3), Amina Aissani - (3)

Study Of The Validity, Limitations And Uncertainty Of A Hybrid Methodology For The Assessment Of Ground-Borne Noise In Buildings. 955

Robert Arcos Villamarin (1,2), Paulo Jorge Brochado Soares (3), Arnau Clot Razquin (1,2), Kenny Fernando Conto Quispe (2), Pedro Alves Costa (3), Luis Manuel Cortesão Godinho (4)

Inversión De Modelo, Teoría Y Aplicación . 962

Albert Isnardo Iglesias, Pere Vicens Rodríguez Sorribes

Control De Vibraciones Y Temperatura En Entornos Altamente Demandantes. 968

Sergio Anda Pérez



- Acústica Afectiva: Un Estudio Sobre Impacto De Las Emociones Humanas En La Proliferación Celular A Través De Las Ondas Mecánicas.** 973
David Del Rosario Gilabert, Gema Esquiva Sobrino, Violeta Gómez, Vicente, Daniel Ruiz Fernández, Pedro Poveda Martinez, Jesús Carbajo San Martín, Jaime Ramis Soriano
- Reducción Del Ruido De Rodadura Ferroviario Mediante Dispositivos Amortiguadores De Capa Restringida Considerando Modelos Viscoelásticos Integrales.** 979
Xavier Garcia Andrés (1,2), José Martínez Casas (1), Francisco David Denia Guzmán (1), Astrid Pieringer - (2), Wolfgang Kropp - (2)
- Análisis De Parámetros Críticos En La Configuración De Un Ensayo No Destructivo Para Membranas .** 985
Antonia María Lima Rodríguez, Luis Francisco Caminos Gámez, Antonio González Herrera, José Manuel García-Manrique Ocaña
- Visualización De Vibraciones Sin Contacto Mediante Cámaras De Alta Velocidad.** 990
Pablo Alloza Frutos (1), Sergio Anda Pérez (2)
- Posibilidades y límites de la reducción de vibraciones en la trayectoria de propagación.** 995
Laura Ibáñez. Michael Österreicher

XCHA-0 Challenge SEA

998

Escape Room. Concienciación sobre los efectos del ruido en adolescentes.

Lena Benito-Sendin, Lara del Val Puente, Ana Isabel Tarrero Fernández

Claxon .

Pablo Ebohon Serna

1002



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AAM-0 Acústica ambiental. Gestión y control del ruido.



NUMERICAL DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL CHARACTERISATION OF A LOW HEIGHT BARRIER FOR RAILWAY NOISE MITIGATION

João Lázaro^{1*}
Pedro Alves Costa¹
Luís Godinho²

¹CONSTRUCT, Faculty of Engineering (FEUP), University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

²ISISE, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788, Coimbra, Portugal;

ABSTRACT

The increasing use of railways for transporting people and goods is essential to achieve more environmentally and economically sustainable mobility. However, issues related to noise pollution caused by train traffic need to be mitigated to maintain a healthy coexistence between inhabitants and trains.

This paper presents the characterization of a low-height acoustic barrier to be used in a railway environment, numerically developed in a first phase using 2D BEM and which bases its working principle on the curved geometry, capable of sending a large amount of energy back to the track. The solution is placed close to the noise source and takes advantage of the ballast to increase the efficiency of the developed solution. The numerical results show Insertion loss levels in the order of 10 dB for a set of receivers close to the track. The experimental campaign with the prototypes developed on a section of the Sintra line, in Portugal, corroborates the results obtained numerically.

For the various records obtained from the passage of numerous trains, Insertion loss values higher than 10 dB were obtained for the frequency range between 400Hz and 4000 Hz.

Key words— Low-height railway noise barriers, Railway noise, Mitigation measures

1. INTRODUCCIÓN

The railway system is known for being an eco-friendly mode of transportation that utilizes minimal energy. However, a major issue that continues to plague the system is the high noise levels it generates [1, 2]. While acoustic barriers have been implemented to combat this problem, their height can pose a challenge, nevertheless the use of low height acoustic

barriers is a solution with proven efficiency for this problem [3, 4]. Therefore, the development and optimization of low-height acoustic barriers using the Boundary Element Method (BEM) and experimental testing is the focus of this work.

Previous studies have shown that low-height barriers can be a viable alternative to traditional acoustic barriers [3-7]. By utilizing a numerical model, we can better understand how sound waves [6, 8, 9] interact with the barrier and determine the most effective solution for reducing railway noise.

The barrier's design takes advantage of the railway system's elements, leveraging the acoustic properties of the ballast to absorb sound waves and redirect energy towards the track. Prototypes were constructed and tested in both free-field and railway environments. While free-field tests showed high levels of insertion loss, testing the barrier in isolation resulted in efficiency losses at certain frequencies.

However, in railway environment tests, the barrier's effectiveness was evident, with insertion loss values of at least 10 dB across a frequency range of 400 Hz to 4000 Hz. This clearly demonstrates that the barrier can be an effective tool in reducing railway noise when integrated into the railway system.

2. NUMERICAL DEVELOPMENT OF THE BARRIER

The development of the barrier was carried out using the Boundary Element Method (BEM). This method offers significant potential for solving acoustic problems, enabling analysis of complex geometries [9, 10]. The method just requires only the discretization of boundaries and discontinuities within the medium. The determination of acoustic variable values at the boundary and within the medium is accomplished using Green's functions.

The barrier's geometry was designed for optimal efficiency, leveraging the physical properties of sound waves. Thus, the

* *Autor de contacto:* jlazaro@fe.up.pt

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

focus is on favoring the normal reflection of waves on the barrier's surface, redirecting as much energy as possible back to the track. To achieve this, a numerical simulation of a sound wave affected by the presence of the vehicle and the railway track was conducted as illustrated in Figure 1. The inner face of the barrier was then designed to coincide with the wavefront geometry and achieve the desired objectives. More detailed information about this process can be found in [11, 12]. In addition the barrier height was set at 1.20 m to ensure a harmonious coexistence between the mitigation solution and the resident population. Lastly, the distance between the barrier and the track, which greatly impacts the solution's performance, was established in accordance with safety considerations, and it was set at approximately 1.23 m between the rail and the barrier.



Figure 1 - Sound wave simulation diagram for defining the barrier geometry.

Additionally, for the definition of the numerical model, the following considerations were taken: for the ballast, an absorption coefficient was considered according to experimental data from reference [13]. It is assumed that both the vehicle and noise barrier have zero absorption coefficients due to their complete reflectivity in practice. In order to evaluate the acoustic performance of the barrier, the Insertion Loss was calculated for an array of receivers located approximately 7 meters away from the track. The array spans around 6 meters horizontally and 3 meters vertically, as illustrated in Figure 2.

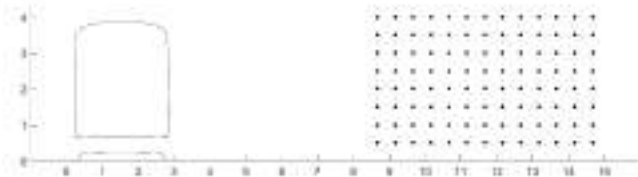


Figure 2 - Representation of the mesh of receivers used to calculate Insertion loss.

The average Insertion loss was calculated for the receiver array described earlier, covering frequencies from 400 Hz to 4000 Hz. The outcomes are illustrated in Figure 3. It can be seen that values greater than 10 dB were achieved across the frequency range under investigation. For lower frequencies, the values remain between 10 dB and 15 dB, with a slight dip

at 1000 Hz. As the frequencies increase, there is a gradual rise in the insertion loss, reaching a peak of around 18 for the frequency 3000 Hz.

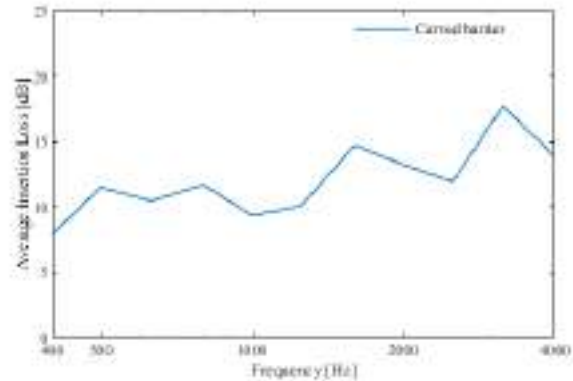


Figure 3 - Average insertion loss calculated for the low height curved barrier.

3. EXPERIMENTAL RESULTS IN FREE FIELD

3.1. Measurement setup

The field-free experimental campaign allows for testing the barrier in a controlled environment, aiming to achieve insertion loss levels as realistic as possible. It should be emphasized that this experimental study solely focuses on the presence of the barrier as a stand-alone element.

The receivers were located at six distinct points. In the first configuration, three receivers were situated at a height of 1.5 meters, positioned at distances of 1.5 meters, 4.5 meters, and 7.5 meters from the acoustic barrier, respectively. The second configuration maintained the same distances from the barrier but positioned the microphones at a height of 2.35 meters, as illustrated in Figure 4. Lastly, in terms of the alignment of the barrier, five barrier modules were positioned and aligned, spanning a total length of 12 meters. A layer of sand was prepared to facilitate the placement of precisely leveled and aligned barriers. Silicone was used between the modules to prevent the passage of waves through the dry joints.

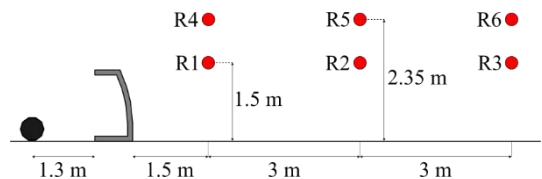


Figure 4 - Representation of the measurement setup used in the free field.

3.2. Results of the experimental campaign on free field

The Insertion Loss values are elevated, surpassing 10 dB for higher frequencies, and demonstrating greater variability for lower frequencies. A dip is noticeable around the 1000 Hz

frequency across all receivers. The Figure 5 through Figure 10 depict the outcomes obtained for each receiver. The results for receiver number 1 (R1), showcased in Figure 5, exhibits Insertion Loss levels exceeding 10 dB for most of the frequency range. However, a reduction in the barrier's effectiveness is seen within the 800 Hz to 1200 Hz range, resulting in minimum IL values of 5 dB. The Insertion loss levels of the receiver number 2 (R2) (see Figure 6) displays a behavior similar to R1, with Insertion Loss exceeding 10 dB for most frequencies. Notably, the 400 Hz to 800 Hz and 1500 Hz to 4000 Hz ranges stand out. A dip in efficiency reappears in the 1000 Hz to 1250 Hz frequency span, registering an IL value of 5 dB.

For receiver number 3 (R3) (see Figure 7), located farthest from the barrier, Insertion Loss values surpass 10 dB for lower frequencies (400 Hz to 1000 Hz). A decline in IL levels occurs from 1000 Hz, with a value of 5 dB within the 1600 Hz to 2000 Hz range. Higher frequencies again yield IL values slightly exceeding 10 dB. A significant drop in barrier performance is observed at 1250 Hz, with an almost negligible IL value in this one-third octave band. The position reduces barrier protection and magnifies the influence of direct waves from the source.

Receiver number 4 (R4) (Figure 8), situated 1.5 meters from the barrier, is notably affected by both direct and diffracted waves. As a result, attenuation is relatively low, with IL values close to zero or negative. However, frequencies above 1250 Hz demonstrate IL values nearing 10 dB. Despite a dip and slight amplification at 800 Hz, the barrier exhibits considerable mitigation capabilities, especially since this receiver is in a transitional zone.

For receiver 5 (R5) (Figure 9) and receiver 6 (R6) (Figure 10), positioned farther from the barrier, the mentioned instability is less pronounced. Receiver 5 showcases IL values exceeding 10 dB for the 400 Hz to 800 Hz and 1500 Hz to 4000 Hz ranges. A dip in the 1000 Hz to 1250 Hz range exhibits IL values around 4 dB. For receiver 6, the results point out values above 10 dB for most of the frequency range, with emphasis on low and high frequencies.

In conclusion, the analysis demonstrates that the majority of receivers exhibit notably high IL values. It is important to emphasize once again that these results relate to the assessment of the barrier as an isolated element. Since the solution was designed to take advantage of the properties of

the surrounding system, the results obtained are affected by the non-presence of both the track and the vehicle.

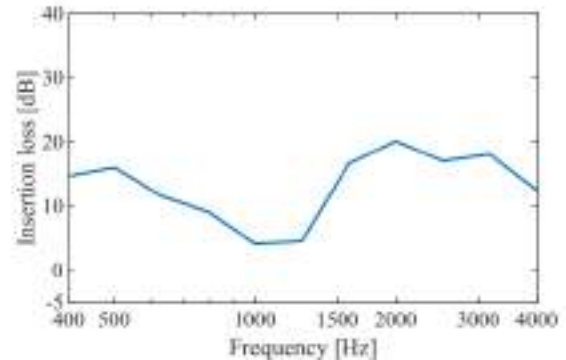


Figure 5 - Insertion loss for receiver R1.

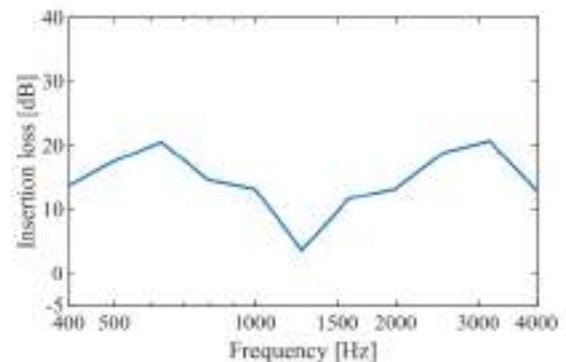


Figure 6 - Insertion loss for receiver R2.

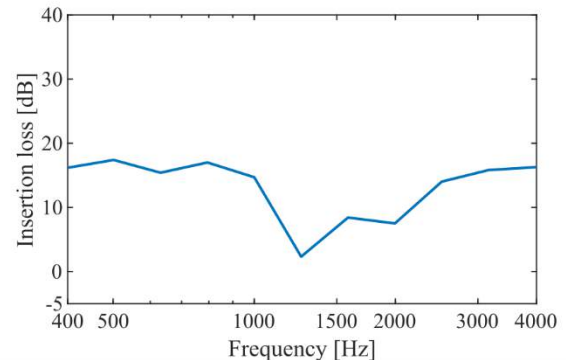


Figure 7 - Insertion loss for receiver R3.

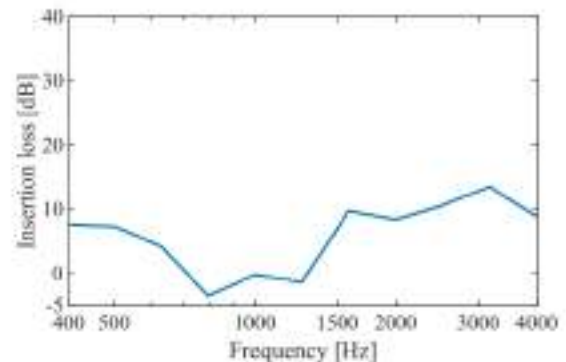


Figure 8 - Insertion loss for receiver R4.

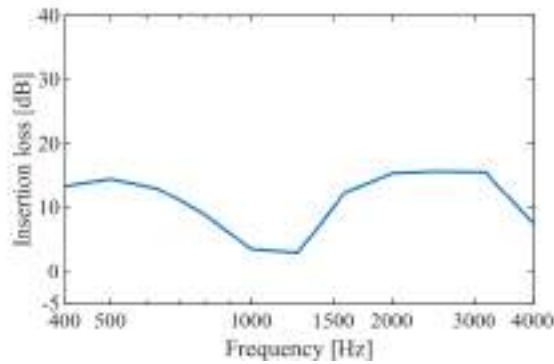


Figure 9 - Insertion loss for receiver R5.

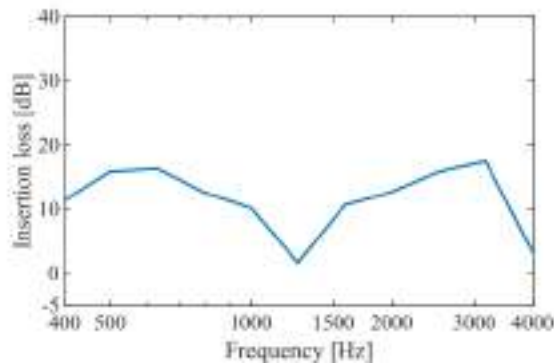


Figure 10 - Insertion loss for receiver R6.

4. EXPERIMENTAL RESULTS IN RAILWAY ENVIRONMENTAL

The experimental campaign conducted on the Sintra railway line in Portugal plays a crucial role in enhancing the comprehension of the barrier's functionality. Prototype acoustic barriers were installed along a section of the Sintra railway line at kilometer point PK23+760. This railway line connects the cities of Sintra and Lisboa and experiences substantial urban traffic.

In terms of infrastructure, the track consists of a double ballast surface designed to accommodate urban passenger transport vehicles. The speed range at this location varies between 60 km/h and 90 km/h. The Figure 11 provides a photography of vehicle circulating on the Sintra railway line in measurement site.



Figure 11 - Photography of the barrier and the train on the Sintra line.

The noise barrier prototype was implemented on an 80 m alignment and was divided into three parts to accommodate safety requirements. This division was primarily done to create a safe distance from a catenary pole. The first and third alignments, comprising 15 barrier modules each, are located 1.60 m away from the outer rail. The second alignment, which is aligned with a catenary pole, is positioned approximately 3.16 m away from the outer rail. Taking into account the positioning of the barrier alignments, a reference microphone was positioned outside the area of influence of the barriers (Microphone 1) and two microphones were positioned behind each of the barrier alignments, in this case microphone 2 and microphone 3 according to Figure 12.

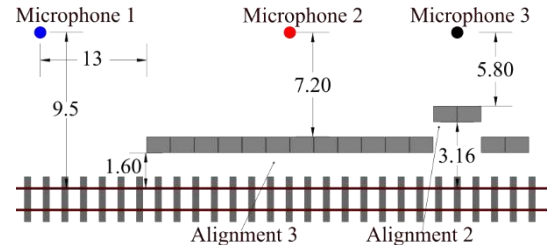


Figure 12 - Representation of the measurement setup used in the railway environment.

4.1. Results of the experimental campaign on Sintra railway line

4.1.1 Analysis of the indicator $L_{Aeq,T}$

The speed of the train plays a decisive role in determining noise levels and the effectiveness of the acoustic barrier. By calculating the equivalent continuous sound level $L_{Aeq,T}$ for each passing train, the barrier's efficiency can be assessed. This involves comparing the indicator value within the barrier's influence area with that of the microphone positioned outside this area. The Figure 13 and the Figure 14 illustrates the $L_{Aeq,T}$ indicator corresponding to train passages through the measurement section regarding all recorded instances. These passages occur in both the Sintra-Lisbon

direction (closer to the barriers) and the Lisbon-Sintra direction (farther from the barriers).

Firstly, upon analyzing Figure 13, a distinct correlation between the rise in the $L_{Aeq,T}$ indicator value and the train's operating speed becomes evident. This increase manifests both at the microphone positioned outside the barrier's influence area and at the receivers situated in the shadow zone of the prototype. Secondly, a closer examination of the mentioned Figures, reveals a noticeable reduction in the $L_{Aeq,T}$ indicator values. For microphone 1, positioned beyond the barrier's influence area, the indicator value is approximately 90 dBA. Conversely, for each microphone placed behind the barrier, the indicator is approximately 80 dBA for microphone number 2 and slightly lower, approximately 75 dBA, for microphone number 3. This signifies a reduction of at least 10 dBA in the readings captured by the microphones positioned within the barrier's influence area.

For vehicles traveling along the track farther from the acoustic barriers, in the Lisbon-Sintra direction (see Figure 14), the $L_{Aeq,T}$ values are lower for the microphone outside the barrier's influence area due to the increased distance. However, they generally surpass 80/85 dBA. Concerning the microphones situated behind the barrier, a decrease in the indicator ranging from 5 dBA to 10 dBA is observed. The smaller reduction is attributed to the greater distance between the barrier and the track. Nonetheless, given the 1.20 m height of the barriers, the considered travel speeds, the outcomes are notably favorable, showcasing substantial reductions in noise levels. In summary, the indicator indicates reductions ranging from 10 dBA to 15 dBA for vehicles in proximity to the barrier, while for vehicles traveling farther along the track, the reduction lies between 5 dBA and 10 dBA.

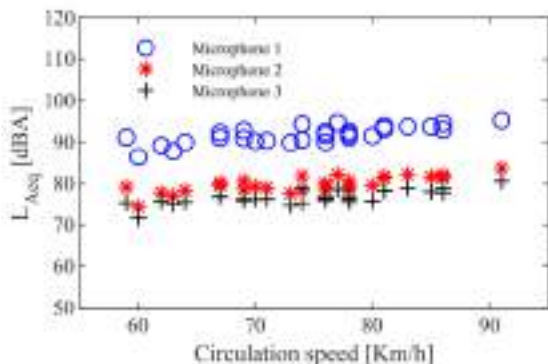


Figure 13 - $L_{Aeq,T}$ value for vehicles traveling close to the barrier.

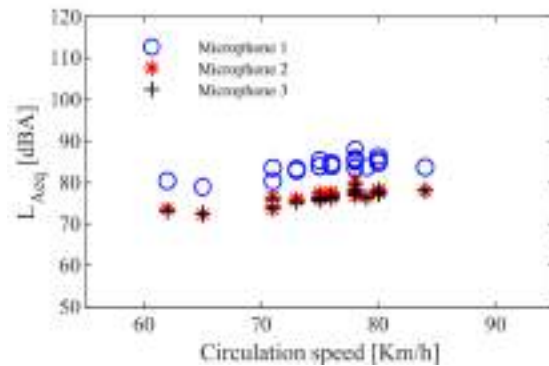


Figure 14 - $L_{Aeq,T}$ value for vehicles traveling away to the barrier.

4.1.2 Analysis of the Insertion loss

Regarding the Insertion Loss values, firstly for vehicles traveling in Sintra-Lisbon direction (closer to the barriers), for microphone 2 (depicted in Figure 15), IL levels hover around 10 dB across most of the frequency range. A minor decline is observable between 500 Hz and 800 Hz, registering minimum IL values around 8 dB. Notably, this particular receiver exhibits maximum mitigation at higher frequencies, stabilizing at approximately 15 dB.

Analyzing the microphone 3 (shown in Figure 16), the aforementioned receiver follows a similar mitigation trend, albeit with slightly elevated IL values. Despite its more distant placement from the track, the Insertion Loss consistently exceeds 10 dB across all frequencies. It's noteworthy that the rise in IL for microphone 3 compared to microphone 2 can be attributed to their respective distances from the alignment. This disparity can be elucidated by the creation of a shadow zone resulting from the full barrier alignment. Positioned at the precise midpoint of the total barrier alignment, microphone 3 benefits from heightened protection in comparison to microphone 2, which is situated at the midpoint of alignment 3. The data collected from microphone 2 is markedly influenced by its proximity to the barrier's edge.

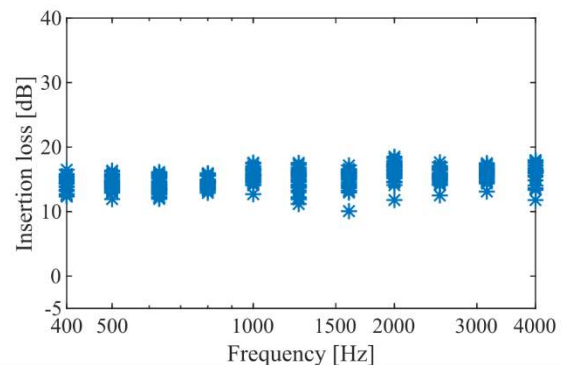


Figure 15 - Insertion loss for Microphone 3 for vehicles circulating close to the barriers.

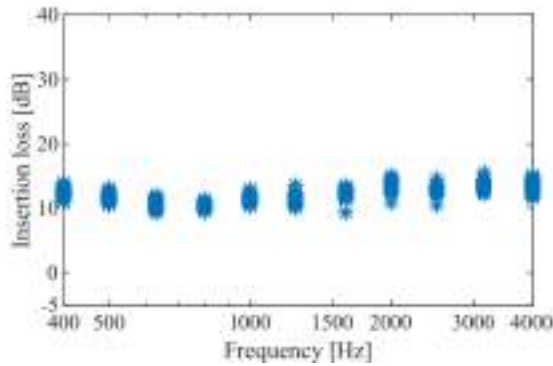


Figure 16 - Insertion loss for Microphone 2 for vehicles circulating close to the barriers.

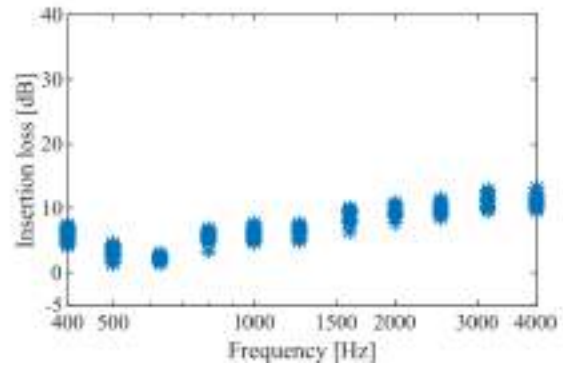


Figure 18 - Insertion loss for Microphone 2 for vehicles circulating away to the barriers.

When considering trains traveling in the opposite direction, from Lisboa to Sintra, which is farther away from the barrier, there is a noticeable reduction in Insertion Loss levels, particularly as the distance between the barrier and the track increases from 1.60 m to over 5 m. The Insertion Loss values, focusing on the same receivers examined earlier, reveals a decline in lower frequencies up to 1250 Hz (see Figure 17 and Figure 18). Within this range, IL values hover around 6 dB to 7 dB. Notably, between 500 Hz and 630 Hz, the IL values approach approximately 3 dB. Moving into higher frequencies, particularly from 1500 Hz onward, there is a rebound in IL levels, often reaching or surpassing 10 dB in certain instances. At frequency of 4000 Hz, the IL values predominantly exceed 10 dB. In the scenario of vehicles traveling at greater distances from the barrier, the distinction between the microphone situated behind alignment 3 and the microphone aligned with the catenary post becomes less pronounced. In fact, the increased distance between the barriers and the noise source seems to mitigate the impact of the shadow zone generated by the complete barrier alignment.

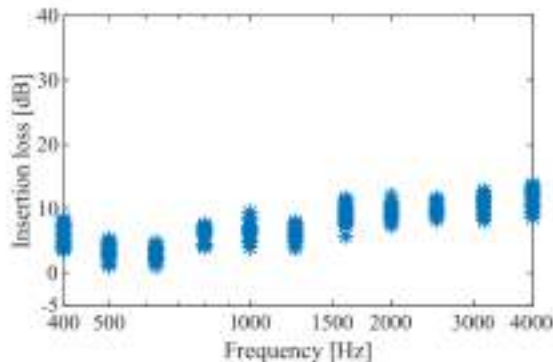


Figure 17 - Insertion loss for Microphone 3 for vehicles circulating away to the barriers.

5. COMPARISON BETWEEN NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODEL

The aim of this section is to compare the numerical results with the experimental railway scenario to verify and demonstrate the capability of the numerical models to predict the behavior of the acoustic barrier. For the simulation of the experimental scenario on the Sintra railway line, a 2D model was chosen.

Concerning the practical aspects of the models, the vehicle geometry was modeled as close to reality as possible, as well as the surrounding environment. It was also considered that both the barrier and the vehicle would be totally rigid, without acoustic absorption capability. For the ballast, an absorption coefficient was considered according to experimental data from reference [13]. The Figure 19 illustrates the model used on simulation.

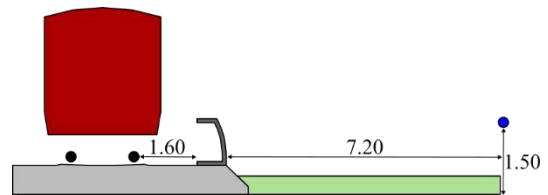


Figure 19 - Representation of the numerical model to validate the results.

Considering the various experimental records obtained, an envelope was created with the values of Insertion Loss. The numerical results do not account for local phenomena and instabilities that can affect measurements. Therefore, the numerical IL values are compared against the experimental data, expecting the numerical IL values to vary within the interval defined in the data for each one-third octave band. In Figure 20, the results of the numerical model are presented, where the train is moving close to the acoustic barrier (refer to Figure 19).

Taking into account uncontrollable conditions, local phenomena, and other external elements that impact

experimental results and cannot be numerically modeled, a very satisfactory approximation between the numerical and experimental Insertion Loss results was achieved.

For the frequency range up to 1000 Hz, the numerical IL curve aligns remarkably well with the set of experimental results. The same observation holds for the two higher one-third octave bands, i.e., 1600 Hz and 2000 Hz. However, for the one-third octave band corresponding to the frequency of 1250 Hz, a slight discrepancy is noticed. In this case, the numerical model presents a slightly higher Insertion Loss value compared to the experimental measurements.

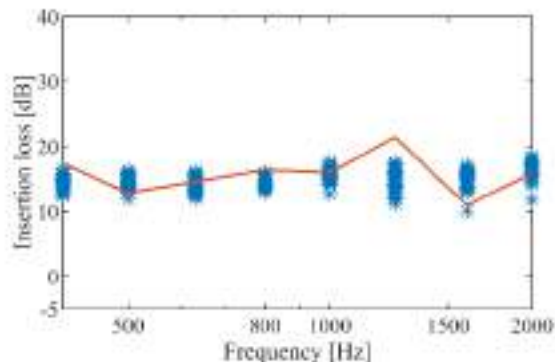


Figure 20 - Comparison between numerical results (red line) and experimental results (blue asterisks).

6. CONCLUSIONS

In this article, the development and testing of a low-height barrier specifically designed for use in railway environments was explored. Through the use of acoustic principles inherent in the ballast and railway system, has developed acoustic barrier that can effectively reduce noise levels by up to 10 dB within a frequency range of 400 Hz to 4000 Hz. The experimental results have confirmed the barrier's effectiveness, with insertion loss values exceeding 10 dB when the barrier was positioned 1.60 meters away from the track. This makes the barrier an ideal solution for reducing noise pollution in railway settings.

7. REFERENCES

[1] EEA (European Environment Agency). Environmental Noise in Europe—2020; Technical Report; EEA (European Environment Agency): Copenhagen, Denmark, ISBN9789294802057.

[2] Blanes, N.; Marin, A.; Ramos, U.M.J. Noise Exposure Scenarios in 2020 and 2030 Outlooks for EU 28; European Topic Centre on Air pollution, transport, noise and industrial pollution – Norwegian Institute for Air Research: Kjeller, Norway, 2019.

[3] Koussa, F.; Defrance, J.; Jean, P.; Blanc-Benon, P. Acoustic performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches. *Appl. Acoust.* 2013, 74, 189–197.

[4] Jolibois, A.; Defrance, J.; Koreneff, H.; Jean, P.; Duhamel, D.;

Sparrow, V.W. In situ measurement of the acoustic performance of a full scale tramway low height noise barrier prototype. *Appl. Acoust.* 2015, 94, 57–68.

[5] Nieuwenhuizen, E.; Yntema, N. The effect of close proximity, low height barriers on railway noise. In *Proceedings of the Euronoise, Heraklion, Crete, Greece 2018*; pp. 1375–1380.

[6] Kasess, C.H.; Kreuzer, W.; Waubke, H. Deriving correction functions to model the efficiency of noise barriers with complex shapes using boundary element simulations. *Appl. Acoust.* 2016, 102, 88–99.

[7] Krezel, Z.A.; McManus, K. Recycled aggregate concrete sound barriers for urban freeways. In *Waste Management Series*; Elsevier: Harrogate, England, 2000; Volume 1, pp. 884–892.

[8] Crocker, M.J. *Handbook of Noise and Vibration Control*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2007.

[9] Kirkup, S.M. *The Boundary Element Method in Acoustics; Integrated Sound Software*; University of Central Lancashire: Preston, UK, 2007.

[10] Steffen Marburg and Bodo Nolte. *Computational acoustics of noise propagation in fluids: finite and boundary element methods*, volume 578. Springer, 2008.

[11] João Lázaro, Matheus Pereira, Pedro Alves Costa, and Luís Godinho. Performance of low-height railway noise barriers with porous materials. *Applied Sciences*, 12(6), 2022.

[12] João Lázaro, Matheus Pereira, Pedro Alves Costa, and Luís Godinho. Numerical development of a low height acoustic barrier for railway noise mitigation. In *International Conference on Wave Mechanics and Vibrations*, pages 1009–1018. Springer, 2023.

[13] R. A. Broadbent, D. J. Thompson, and C. J. C. Jones. *The acoustic properties of railway ballast*. 2009.

A INFLUÊNCIA DO PAVIMENTO COMO MEDIDA DE REDUÇÃO DO RUÍDO NA FONTE | UM CASO DE ESTUDO

Maria João Rato¹, Maria Inês Ramos¹, Rosa Daniela Domingues¹, Maria Margarida Braga¹, Luis Dias Fernandes¹, Elisabete Fraga Freitas²

¹ BRISA, Quinta da Torre da Aguilha – Edifício Brisa, 2785-599 São Domingos de Rana, Portugal

² Universidade do Minho, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800 058 Guimarães, Portugal

RESUMO

No quadro das diretivas europeias sobre avaliação e gestão do ruído ambiente, a Brisa tem desenvolvido ações que visam avaliar a influência dos pavimentos como medida de redução do ruído e, subsequentemente, ajustar a aplicabilidade do método de previsão de ruído CNOSSOS à realidade da rede rodoviária concessionada.

Neste sentido, foram selecionados diversos sublanços onde ocorreu a substituição da camada de desgaste em Betão Betuminoso Drenante (PA 12,5) e em Betão Betuminoso (AC 14), em fim de vida, por camadas em Stone Mastic Asphalt (SMA 12) e Betão Betuminoso rugoso (AC 14).

Nesses sublanços realizaram-se medições do ruído pneu-pavimento, antes e após intervenção em tempos distintos, utilizando duas metodologias: o método Estatístico de Passagem (SPB *Method*) e o método da Proximidade Imediata (CPX *Method*). Desta forma, foi possível aferir o efeito da intervenção e da evolução do ruído nos primeiros meses de exploração das camadas em SMA12 e AC 14.

ABSTRACT

Trough the framework of the European directives on the assessment and management of environmental noise, Brisa has developed some actions to assess the influence of pavements as a noise reduction measure and, subsequently, adjusting the applicability of the CNOSSOS noise prediction method, to the reality of the concession road network.

To achieve this, several sub-sections were selected where the end-of-life of a Porous Asphalt (PA 12.5) and Asphalt Concrete (AC 14) wear layer were replaced with Stone Mastic Asphalt (SMA 12) and new Asphalt Concrete (AC 14) layers.

Noise tyre-pavement measurements were made on these sections, before and after the intervention at different times, using two methodologies: the Statistical Pass-By method (SPB method) and Close Proximity method (CPX method). Using these methodologies, it was possible to evaluate the effect of the intervention and the evolution of the noise in the first few months of the exploration of the layers.

Key-words— Sustainability, Pavements, Noise, Tests, Models

1. INTRODUÇÃO

O ruído pneu-pavimento é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelo comportamento dos condutores, pelas características dos pneus, pelas características da superfície do pavimento (macro e megatextura, irregularidade, porosidade, rigidez, idade, desgaste e presença de água) e pelo clima [1]. As relações causa-efeito estabelecidas têm vindo a ser confrontadas ou confirmadas, encontrando-se resumidas, por exemplo, em [2]. A evolução do ruído pneu-pavimento ao longo do tempo não tem tido a atenção devida. Porém, a necessidade sentida de ajustar a aplicabilidade do método de previsão de ruído CNOSSOS à realidade de cada rede rodoviária veio impulsionar este tipo de estudos.

Para a medição do ruído pneu-pavimento existem métodos de ensaio específicos, que devem ser complementados com outros ensaios de caracterização da superfície como é o caso da textura, da absorção sonora e da rigidez da camada superficial [3]. Em Portugal o Método Estatístico de Passagem (*Statistical Pass-By method*, SPB) e Método da Proximidade Imediata (*Close ProXimity method*, CPX), começaram a ser aplicados de forma sistemática na rede rodoviária recentemente, sendo os estudos mais antigos de carácter exploratório ou para apoiar atividades de investigação [4, 5].

Recentemente, foi adaptado para as condições portuguesas o manual referente aos critérios de contratação pública ecológica, no âmbito da ENCPPE 2020 que visa apoiar os processos de «Conceção, construção, reabilitação e conservação de estradas» [6]. Neste documento são indicados requisitos mínimos aplicáveis à conceção de pavimentos de baixo ruído, que dentro dos critérios essenciais para pavimentos novos de baixo ruído, tomam os seguintes valores, mas apenas para método CPX:

- 90 dB(A) a 50 km/h; e/ou
- 95 dB(A) a 70 km/h; e/ou
- 98 dB(A) a 90 km/h.

Neste documento admite-se um aumento inferior a 3 dB(A) durante o período mínimo de garantia (cinco anos), que o nível de ruído máximo, medido pelo método CPX, pode sofrer. Não obstante, é apenas um documento orientador e, por isso, em Portugal não existe documentação técnica que

defina valores de referência no que respeita à conformidade de produção ou desempenho ao longo do tempo.

No enquadramento ditado pelas diretivas europeias sobre avaliação e gestão do ruído ambiente (2002/49/CE [7] e (EU)2015/996 [8], de 25 de junho e de 19 de maio, respetivamente), a Brisa – Concessão Rodoviária, S.A. tem desenvolvido esforços para determinar a influência dos pavimentos como medida de redução do ruído na fonte e, simultaneamente, validar a aplicabilidade do método de previsão de ruído CNOSSOS à realidade da rede rodoviária de que é Concessionária.

Neste contexto, este trabalho analisa o efeito da substituição da camada de desgaste em Betão Betuminoso Drenante (PA 12,5) e em Betão Betuminoso Rugoso (AC 14), em fim de vida, por uma nova camada de Betão Betuminoso Rugoso (AC 14) e por uma camada de elevado desempenho em Stone Mastic Asphalt (SMA 12), através dos métodos SPB e CPX.

2. SECÇÕES DE ESTUDO E METODOS DE ENSAIO

2.1. Metodologia do estudo

Para este estudo exploratório foram selecionados três sublanços de autoestradas diferentes, onde estavam previstas intervenções no pavimento, isto é, a substituição da camada de desgaste existente por uma do tipo SMA 12 e AC 14. Antes e após a intervenção, o ruído pneu-pavimento foi avaliado utilizando duas metodologias distintas: o método Estatístico de Passagem (SPB), e o método da Proximidade Imediata (CPX). Deste modo, foram consideradas 3 fases de avaliação do ruído: a fase 1 corresponde ao momento antes da intervenção e reflete o estado deste em fim de vida funcional; a fase 2 corresponde à avaliação efetuada pouco tempo depois da intervenção efetuada e a fase 3 reflete o desempenho em termos acústicos ao fim de cerca de 1 ano de vida útil.

2.2. Descrição das secções de estudo

Na Tabela 1 são identificadas as secções de Autoestradas selecionadas para o estudo e caracterizadas em termos de tipo, idade e volume do tráfego a que foram submetidas.

Tabela 1. Identificação e caracterização das autoestradas.

Autoestrada	A	B	C
Extensão (km)	9,4	8	20,1
Tipo de mistura antes da intervenção	PA 12.5	AC 14	PA 12.5
Tipo de mistura depois da intervenção	AC 14	SMA	SMA
Idade na fase 2 (meses)	1	1	1
Idade na fase 3 (anos)	-	1,4	1,4
Tráfego acumulado F1-F2 (NV)	420930	312720	561840
Tráfego acumulado F2-F3 (NV)	-	5129173	10939758

2.3. Método estatístico de passagem (SPB)

O método estatístico de passagem (*Statistical Pass-By method* - SPB) é um método normalizado publicado pela norma ISO 11819-1:1997 - Acústica – Medição da influência dos pavimentos no ruído de tráfego rodoviário, para a determinação de um indicador que considera o ruído emitido pelo tráfego rodoviário de passagem.

Com este método pretende-se obter uma avaliação quantitativa das superfícies dos pavimentos rodoviários relativamente ao ruído do tráfego rodoviário.

O método SPB implica a realização de várias medições “*in situ*” do nível máximo de pressão sonora, L_{max} , à passagem do um veículo e da respetiva velocidade de circulação, em condições normais de circulação. Após a passagem de, pelo menos, 100 veículos ligeiros e 80 pesados, é estabelecida uma correlação linear entre o logaritmo da velocidade e o nível sonoro máximo obtido, determinando-se em seguida o nível sonoro correspondente a uma determinada velocidade de referência estabelecida em função do tipo de rodovia. O indicador SPB resultante do presente método é um valor em índice, em dB(A), com o objetivo de comparar pavimentos e que tem por base, níveis de ruído de diferentes categorias de veículos.

Neste trabalho, dado que o objetivo do método era medir cada veículo “*per se*” sem a interferência de outros veículos, foram utilizadas apenas duas classes de veículos (ligeiros e pesados).

2.4. Método da proximidade imediata (CPX)

O método da proximidade imediata (*Close Proximity method* - CPX) é também um método normalizado, estando descrito na norma ISO 11819-2. No presente caso, a medição do ruído foi feita junto a uma das rodas do veículo de aquisição, onde se colocou dois microfones conforme o esquema de montagem definido na norma. Os sinais registados durante o ensaio são processados por um software de análise e a emissão do ruído global (com ponderação A) é avaliada através da aplicação do método das médias temporais em secções de 20 metros à média energética dos níveis sonoros registados por cada microfone, e ainda pelo espectro sonoro correspondente em bandas de 1/3 oitava (LCPX). Neste estudo utilizou-se apenas o pneu representativo dos veículos ligeiros (P) e foram efetuadas medições ao longo das secções de Autoestrada selecionadas para as velocidades de referência de 50 km/h, 80 km/h e 100 km/h.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MÉTODO SPB

3.1. Nível de ruído medido em cada autoestrada

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos pelo ensaio SPB nos três sublanços de autoestrada, antes e depois da substituição da camada de desgaste. Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentados os espectros sonoros para cada Autoestrada.

Tabela 2. Resultados do ensaio SPB.

Autoestrada	FASE	Tip. Veículo	% passagem de veículos (ligeiros/pesados)	L_{max} médio dB(A)	Velocidade média (km/h)	L_{veh} (veloc. Ref.) dB(A) 90km/h e 120km/h	SPB dB(A)
A	1	Lig	93%	80	114	80	81
		Pes	7%	83	82	84	
	2	Lig	93%	79	115	79	80
		Pes	7%	83	88	83	
B	1	Lig	77%	82	114	82	84
		Pes	23%	86	87	87	
	2	Lig	77%	82	122	82	85
		Pes	23%	89	92	88	
	3	Lig	77%	82	107	83	86
		Pes	23%	87	84	88	
C	1	Lig	90%	87	120	86	86
		Pes	10%	87	90	87	
	2	Lig	93%	82	121	81	82
		Pes	7%	84	93	82	
	1a	Lig	94%	78	120	78	78
		Pes	6%	81	85	79	

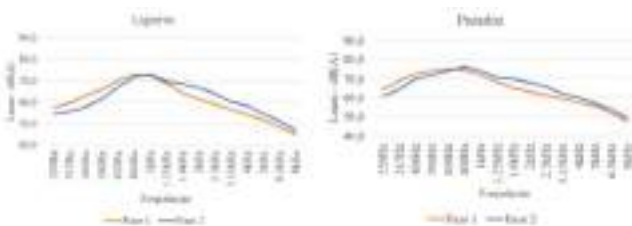


Figura 1. Nível sonoro versus frequência na Autoestrada A.

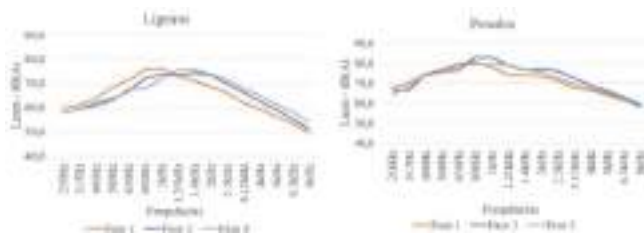


Figura 2. Nível sonoro versus frequência na Autoestrada B.

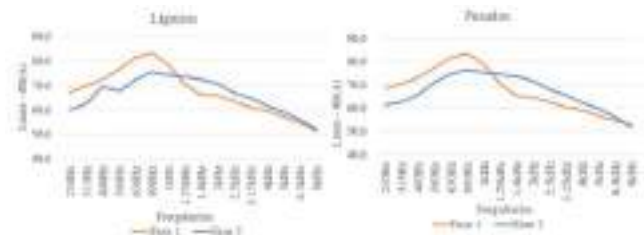


Figura 3. Nível sonoro versus frequência na Autoestrada C.

A comparação dos valores para o indicador SPBI indica uma redução significativa de 4 dB(A), no sublanço da autoestrada C e 1 dB(A) no sublanço da autoestrada A. No sublanço da autoestrada B não se verificou redução deste indicador, mas sim o seu aumento.

Os espectros sonoros provenientes do contacto pneu-pavimento são determinados por vários mecanismos e fatores, sendo que os principais são as vibrações promovidas pela textura do pavimento nos pneus e estado de conservação do pavimento (frequências inferiores a cerca de 1000 HZ), e os movimentos de ar resultantes da interação do piso do pneu com as irregularidades da superfície do pavimento (frequências superiores a cerca de 1000 Hz) e ainda pela absorção sonora [9].

A análise do espectro em frequência evidencia comportamentos idênticos para as baixas e para as altas frequências, em todas as autoestradas, ou seja, nas baixas frequências verificou-se uma redução dos valores de L_{max} , após a aplicação do pavimento e nas altas verificou-se um aumento.

Evidencia-se o espetro da autoestrada B, que revela uma redução de L_{max} na medição de 3ª fase, face à 2ª fase, nas baixas frequências, no caso dos veículos ligeiros, e nas altas frequências, no caso dos veículos pesados. No entanto, o valor de SPB aumentou 1 unidade na comparação entre fases sucessivas.

Relativamente à autoestrada C, apresentam-se os resultados da medição de 3ª fase, na Tabela 2, mas não se procede à apresentação da respetiva curva espectral na Figura 3 por não ser possível efetuar a comparação desses resultados com os das fases anteriores, porque o local de medição teve de ser alterado.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MÉTODO CPX

4.1. Nível de ruído medido em cada autoestrada

A velocidade a que o veículo se encontra no momento da aquisição é determinante para o nível de ruído medido. Para permitir a comparação de resultados nos 3 níveis de velocidade definidos, a partir dos níveis de ruído determinados em cada segmento de 20 m e da velocidade correspondente, foram definidas retas de regressão LCPX - $\log_{10}(\text{velocidade})$, cujo declive (m) pode ser utilizado para corrigir o LCPX medido para uma dada velocidade de referência. Na Figura 4 mostram-se os dados obtidos e as retas de ajuste para as autoestradas B e C. Na Autoestrada A, até à data, existe apenas uma medição. Nesta figura apresentam-se também os parâmetros da reta de regressão obtidos, declive (m) e ordenada na origem (b), e o coeficiente de determinação (R^2).

Observa-se que o parâmetro que representa o aumento do ruído com a velocidade se altera de forma relevante da fase 1 para a fase 2, isto é, antes e após a reabilitação. Além disso, o impacto da intervenção em termos de redução do ruído é superior a velocidades mais elevadas. Entre as fases 2 e 3, o declive manteve-se relativamente estável e próximo do valor de referência recomendado para a correção do efeito da velocidade ($m = 30$).

A partir das retas de regressão, todos os valores de LCPX foram ajustados para as velocidades de referência (50, 80 e 100 km/h). Na Figura 5 mostra-se para as Autoestradas B e C os valores obtidos para a velocidade de referência de 80 km/h antes e após intervenção (fases 2 e 3). Este tipo de visualização, para além de facilitar a comparação dos níveis de ruído obtidos ao longo de um trecho em diversos momentos da vida do pavimento, ajuda a identificar zonas de comportamento homogêneo e heterogêneo, que podem ser relacionadas com fatores explicativos do desempenho, como por exemplo a textura. Ao longo do trecho, antes da intervenção, é notória a variabilidade do ruído particularmente para a autoestrada C. Depois da intervenção, para além de se observar uma redução significativa do LCPX também se observa uma redução da variabilidade do ruído.

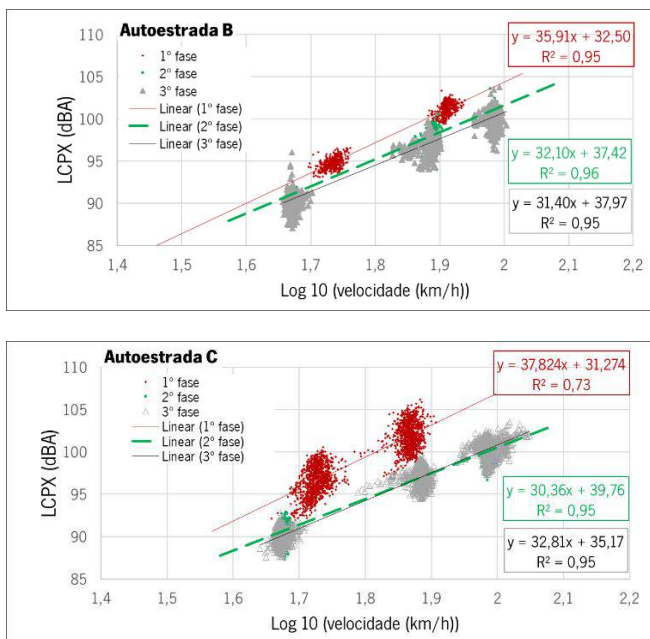


Figura 4. LCPX a 50 (1,7), 80 (1,9) e 100 (2,0) km/h nas Autoestradas B e C.

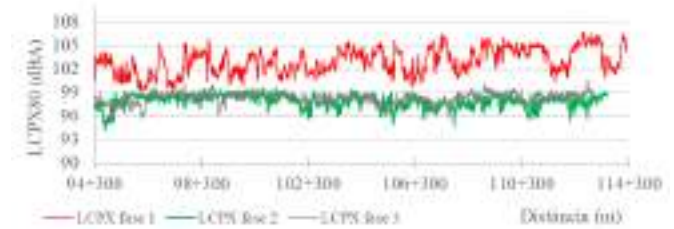
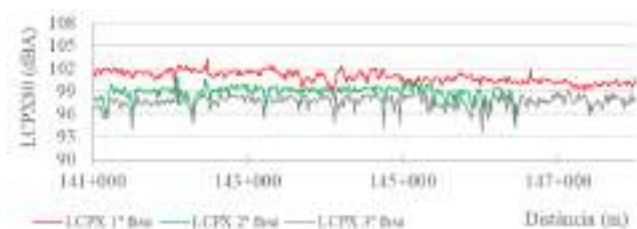


Figura 5. LCPX a 80 km/h na Autoestrada B (em cima) e C (em baixo) antes e após intervenção (exemplo).

Para uma avaliação global do efeito da alteração da camada de desgaste determinou-se a média do LCPX a cada velocidade de referência, nos 2 sentidos de circulação, e o respetivo coeficiente de variação (Tabela 3). A Autoestrada C foi a que mais beneficiou com a alteração da camada, reduzindo o ruído em cerca de 5 dBA, enquanto a Autoestrada B apresentou apenas uma pequena redução (Figura 6). Observa-se também um coeficiente de variação superior antes da intervenção, o que indica que o ruído pneu-pavimento passou a ser mais homogêneo e que o efeito da intervenção em alguns locais é muito superior ao efeito médio determinado pela diferença do LCPX médio.

Tabela 3. Níveis de ruído LCPX a 50, 80 e 100 km/h e coeficientes de variação por sentido.

Autoestrada B - Sentido 1		Fase 1		Fase 2			Fase 3		
Velocidade de referência (km/h)		50	80	50	80	100	50	80	100
LCPX (dBA)	Máximo	95,7	103,4	92,9	101	104	92,4	99,8	103
	Mínimo	92,4	99,1	89,5	94,2	96,3	87	93,5	96,6
	Média	93,7	100,9	91,8	98,8	101	90,7	97,7	101
cv (%) médio		0,65	0,73	0,76	0,88	0,98	0,88	0,89	0,88
Autoestrada B - Sentido 2		Fase 1		Fase 2			Fase 3		
Velocidade de referência (km/h)		50	80	50	80	100	50	80	100
LCPX (dBA)	Máximo	96,4	102,6	94,1	101	104	96,3	99,9	103
	Mínimo	90,9	98	88,9	94,6	96,4	87,6	94,5	98,4
	Média	93,2	100,3	92,5	99,4	102	90,9	98	101
cv (%) médio		1,06	0,86	0,77	0,79	1,13	1,18	0,98	0,91
Autoestrada C - Sentido 1		Fase 1		Fase 2			Fase 3		
Velocidade de referência		50	80	50	80	100	50	80	100
LcpX (dBA)	Máximo	99,3	107,4	93,6	99,6	102	93,1	101	104
	Mínimo	91,7	99,2	88	94,1	96,6	87,8	95,2	99
	Média	95,5	103,2	90,8	97,4	100	90,6	98,3	102
cv (%) médio		1,58	1,56	1,04	1,05	0,89	0,71	0,75	0,73
Autoestrada C - Sentido 2		Fase 1		Fase 2			Fase 3		
Velocidade de referência		50	80	50	80	100	50	80	100
LcpX (dBA)	Máximo	99,5	106,8	92,8	99,1	101	93,4	99,6	103
	Mínimo	92,5	98,7	88,3	94,1	96,6	87,3	94,3	97,9
	Média	95,7	102,7	90,2	96,9	99,3	90,1	97,2	101
cv (%) médio		1,45	1,54	1,21	0,93	1,02	0,9	0,88	0,87

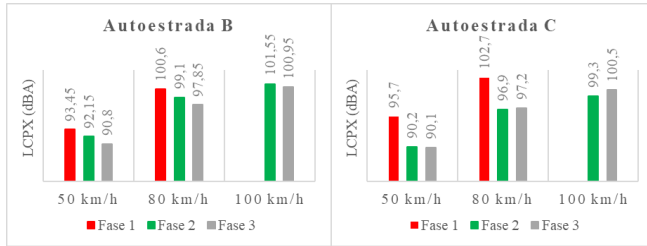


Figura 6. Níveis de ruído LCPX a 50, 80 e 100 km/h médios nas três fases de intervenção.

Comparando os valores médios com os propostos no ENCPE2020, verifica-se facilmente que os valores são ultrapassados para os pavimentos em fim de vida, o que se justifica pela idade dos mesmos. Para o pavimento novo, SMA 12, constata-se que na autoestrada B, a 50 km/h, e na fase 2, o LCPX médio ultrapassa em 2 dB(A) o valor definido, e que sofre uma redução na fase 3. Na autoestrada C este valor também é ultrapassado, mas residualmente. Para a velocidade de 80 km/h, verifica-se que a mistura adotada proporciona mais cerca de 1 dB(A) e para 100 km/h pode atingir os 2 dB(A) em termos médios.

4.2 Análise dos espectros

Na Figura 7 apresentam-se os espectros sonoros para a velocidade de referência de 80 km/h, por sentido, antes e após a intervenção nas autoestradas B e C.

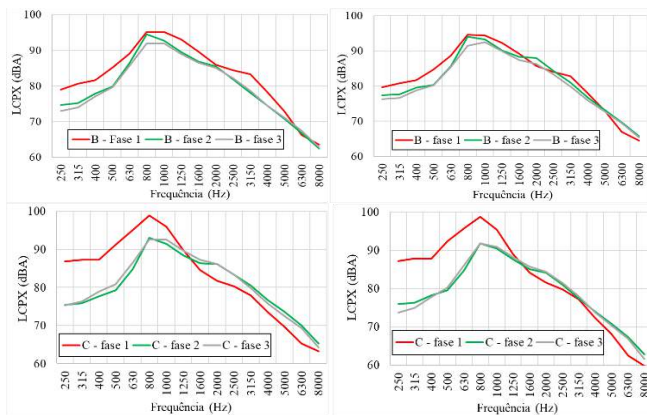


Figura 7. LCPX a 80 km/h versus frequência nas Autoestradas B e C nas três fases de intervenção (sentido 1 na esquerda e sentido 2 na direita).

Na autoestrada C, após a intervenção há uma redução muito significativa do ruído nas baixas frequências e um pequeno aumento nas frequências altas. Deste modo, a nova camada proporcionou uma redução das vibrações nos pneus e afetou negativamente os mecanismos de movimento de ar resultantes da interação pneu pavimento.

Na autoestrada B o efeito da alteração da camada de desgaste é visível ao longo de todo o espectro, o que significa que a redução de ruído se deveu quer à redução da vibração dos

pneus quer ao favorecimento dos movimentos de ar, ambos possivelmente proporcionados pela textura. Considerando a velocidade de 100 km/h, por ser mais próxima da velocidade operacional neste tipo de vias de comunicação, salienta-se que o padrão de desempenho é muito semelhante.

4. COMPARAÇÃO DOS METODOS SPB E CPX

Pela análise dos dados obtidos pelos dois métodos, é possível constatar a redução de ruído após a substituição da camada de desgaste pelo SMA12, excetuando os resultados obtidos pelo método SPB para a Autoestrada B que apontam para um ligeiro aumento.

Verifica-se que os resultados de ambos os métodos permitem estabelecer a mesma hierarquia no que respeita à ordenação das autoestradas em função dos níveis de redução de ruído após a substituição da camada de desgaste, concretamente: Autoestrada C e Autoestrada B.

De igual forma, verifica-se que existe alguma similitude quanto aos níveis de redução de ruído após a substituição da camada de desgaste nas várias autoestradas que são obtidos pelos 2 métodos, designadamente para os veículos ligeiros constata-se uma redução de cerca de 5 dB(A) na autoestrada C e variando entre uma redução de 1,6 dB(A) e um aumento de 1 dB(A) na autoestrada B.

Apenas na análise mais detalhada da redução dos níveis de ruído por gamas de frequência, se verifica uma maior dissonância entre os dois métodos. Efetivamente, na comparação da Fase 1 com as restantes Fases, os resultados do método CPX apontam para que a substituição da camada de desgaste, gere uma maior redução dos níveis de ruído nas baixas frequências, no caso das autoestradas B e C, embora também se verificando alguma redução nas frequências altas, no caso da autoestrada B. Os resultados do método SPB, por seu turno, apontam para que a substituição da camada de desgaste não permita uma redução dos níveis de ruído nas altas frequências em qualquer das autoestradas e que permite uma redução nas baixas frequências.

5. CONCLUSÕES

Em suma, pela análise dos dados obtidos pelos dois métodos, é possível constatar a redução de ruído após a substituição da camada de desgaste pelo SMA 12, excetuando os resultados obtidos pelo método SPB para a Autoestrada B que apontam para um ligeiro aumento.

Relativamente à comparação da Fase 3 com a Fase 2, as diferenças nos valores de SPB e de CPX são muito reduzidas. Por forma a relacionar a redução do ruído verificada com a variação das características superficiais da camada de desgaste do pavimento, haverá ainda que continuar a avaliar estas características após a intervenção efetuada, através de medição em contínuo, para comparação dos valores de MPD obtidos antes da intervenção.

Os dois métodos SPB e CPX apontam para níveis de redução de ruído globais gerados, pela substituição da camada de

desgaste, semelhantes. Todavia, a análise mais detalhada dos níveis de redução de ruído por frequência já indicia alguma dissonância nos resultados que são obtidos pelos dois métodos, o que resulta do efeito de propagação sonora nos resultados do método SPB. Por conseguinte, afigura-se que a utilização dos dois métodos poderá ser complementar, desde logo porque o método SPB permite a observação da redução dos níveis de ruído numa maior panóplia de tipo de veículos e considera uma maior diversidade de fatores e o método CPX permite caracterizar uma extensão de estrada longa num curto período de tempo.

A análise dos dados resultantes dos métodos CPX e SPB sugeriu que estes métodos podem contribuir para a obtenção de dados de base relativos às características do pavimento para os modelos previsionais de ruído. Esses dados, sendo recolhidos “in loco”, deverão ser mais adaptados à realidade e poderão proporcionar a obtenção de modelos mais ajustados às condições existentes [10]. Perspetiva-se, por isso, como um futuro desafio, o desenvolvimento de metodologias para a obtenção dos parâmetros de caracterização dos pavimentos para a sua utilização nos modelos de simulação do ruído, concebendo e delineando os ensaios baseados nos métodos CPX e SPB, desde logo, com esse objetivo, tendo em consideração a tipologia dos pavimentos utilizada na rede operada pela Brisa.

6. REFERÊNCIAS

1. U. Sandberg and E. Jerzy, *Tyre/road noise. Reference book*. Informex, 2002.
2. O. Sirin, *State-of-the-Art Review on Sustainable Design and Construction of Quieter Pavements-Part 2: Factors Affecting Tire-Pavement Noise and Prediction Models*, Sustainability, 8(7), 692.
3. S. Ling, F. Yu, D. Sun, G. Sun, and L. Xu, *A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement*, Journal of Cleaner Production, 287, 125056, 2021.
4. A. Santos, *Estudo da eficácia da redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes*, dissertação de mestrado, curso de Mestrado em Engenharia Rodoviária, Universidade do Minho, 2007.
5. M. Antunes, S. Coutinho, J. Patrício, E. Freitas, J. Paulo, J. Coelho, *Avaliação do ruído de Tráfego: Metodologia para a Caracterização de Camadas de Desgaste Aplicadas em Portugal*, Evaluation of Pavement Surfaces Characteristics, Proceedings of the Seminar, pp 137-145, Guimarães, Portugal, 2008.
6. APA, *Critérios de contratação pública ecológica, no âmbito da ENCPE 2020, para Conceção, Construção, Reabilitação e Conservação de Estradas*, Agência Portuguesa do Ambiente, 2020.
7. Dir. 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de junho de 2002 – Avaliação e gestão do ruído ambiente. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=PT>.
8. Dir. (UE) 2015/996 da Comissão de 19 de maio de 2015 - métodos comuns de avaliação do ruído de acordo com a Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0996&from=IT>.
9. E. Bühlmann and T. Ziegler, *Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre/road interaction model*, Proceedings of the Acoustics 2012 Hong Kong, 2012.
10. F. Anfosso-Ledee and L. Goubert, *The determination of road surface corrections for CNOSSOS-EU model for the emission of road traffic noise*, Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, 2019.

ESPECTÁCULOS EN VIVO Y PROBLEMÁTICA DEL RUIDO

*Sergio Torrano Díaz**

RESUMEN

Mediante esta comunicación se pretende dar visibilidad a una problemática cada vez más recurrente. Y es la convivencia entre el mundo del espectáculo con los vecinos de entornos cercanos.

Para minimizar el impacto de contaminación acústica es cada vez más frecuente la instalación de sensores como el CESVA TA120 en estos entornos para registrar los niveles durante el desarrollo del evento en cuestión.

Sin embargo, no hay una normativa específica y uniforme que especifique las limitaciones y acciones a llevar a cabo.

Esta situación crea gran desconcierto entre ciudadanos, productores y administraciones.

¿Es necesario una normativa ecuaníme al respecto? ¿Qué acciones se deben llevar a cabo?

Se propone la creación de una normativa específica para este tipo de situaciones donde se recojan las medidas preventivas a desarrollar.

Se propone la realización de estudios acústicos previos en las inmediaciones del recinto para la elaboración de mapas de ruido, pues estos eventos acústicos no son considerados dentro de estos generalmente. La obligatoriedad de instalar limitadores acústicos que registren la actividad y una red temporal de sensores en las inmediaciones para asegurar el cumplimiento de la normativa. Todo ello supervisado y certificado por ingenieros cualificados.

ABSTRACT

The aim of this communication is to give visibility to an increasingly recurrent problem. And it is the coexistence between the entertainment world with the neighbors of nearby environments.

To minimize the impact of noise pollution, it is increasingly common to install sensors such as the CESVA TA120 in these environments to record levels during the development of the event in question.

However, there is no specific and uniform regulation specifying the limitations and actions to be carried out.

This situation creates great confusion among citizens, producers and administrations.

Do we need a level playing field? What action should be taken?

It is proposed to create a specific regulation for this type of situation where the preventive measures to be developed are included.

It is proposed to carry out previous acoustic studies in the vicinity of the enclosure for the elaboration of noise maps, because these acoustic events are not considered within these generally. The obligation to install acoustic limiters that record activity and a temporary network of sensors in the vicinity to ensure compliance with the regulations. All supervised and certified by qualified engineers.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una problemática cada vez más presente en nuestra sociedad. Y es que la proliferación de festivales musicales y espectáculos en vivo que se desarrollan cerca de poblaciones con largas jornadas es cada vez más frecuente.

Los ciudadanos por un lado reclaman oferta cultural variada, al alcance de todo el público. En lugares bien comunicados, con todos los servicios, espacios singulares y bien cuidados. Pero en contraposición, en los últimos años se han duplicado e incluso triplicado las quejas por ruido [2]. Y como consecuencia las sanciones a productoras.

Llegados a este punto de inflexión es preciso realizar un análisis de la situación desde diferentes perspectivas para conocer cual es realmente la situación y establecer un equilibrio entre cultura, contaminación acústica y bienestar social.

¿Se incumplía anteriormente la normativa vigente? ¿Se ha aumentado el nivel sonoro de los espectáculos? ¿Se han producido cambios en los diseños de sonido que han llevado a esta situación? ¿El ciudadano es cada vez más sensible a la contaminación acústica?

2. OBJETIVO Y METODOLOGÍA

La presente comunicación tiene como objetivo dar visibilidad a la situación actual que se agrava cada vez más.

Realizando un análisis desde el punto legislativo, tecnológico y social.

Sergio Torrano Díaz* *Autor de contacto:* s.torrano@alumnos.upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Analizando uno de los casos que ha generado y sigue generando más controversia en nuestro país, el festival MAD Cool 2023 que se llevo a cabo en Madrid del 6 al 8 de julio de 2023.

Además, se proponen líneas de investigación futuras que promuevan una legislación actualizada a los nuevos tiempos en el ámbito del espectáculo en vivo en combinación con las tecnologías actuales y que cuenten con la participación de los entes públicos implicados, pero también con productores y asociaciones de ciudadanos.

3. PROPOSICIÓN LEGISLATIVA

La ley del ruido data de 2003 y aunque ha recibido algunas actualizaciones, están queda lejos de la sociedad actual y de los avances tecnológicos de los que disponemos.

Es imprescindible establecer una legislación común al ámbito nacional e incluso europeo que legisle estos eventos efímeros. ¿Es preciso tratar estas zonas de manera especial durante los eventos? ¿Cuáles deben ser los controles y limitaciones?

Aunque la legislación actual establece límites y requiere del uso habitual de agentes de policía para medición y control in situ. A tenor de las numerosas polémicas acaecidas es necesario revisar y actualizar esta legislación y los controles para su correcto cumplimiento.

4. ALGUNAS SOLUCIONES TECNOLÓGICAS

Cada vez son más las consultorías de ingeniería que ofrecen servicios de medición y control para espectáculos en vivo.

De hecho, algunas comunidades más restrictivas exigen la limitación de los sistemas de audio al nivel normativo máximo y el control de los niveles sonoros.

Sin embargo, estas medidas no son uniformes a todo el territorio. Lo que lleva a que se generen conflictos entre entidades públicas, particulares y empresas del espectáculo.

En los últimos festivales se han llegado a incluso realizar mediciones por parte de las empresas promotoras a modo de prevención, de asociaciones de ciudadanos a modo de denuncia y por parte de las autoridades locales a modo de control. Cada una de ellas con métodos y tecnologías diferentes. Dando lugar a discrepancias y litigios.

5. DISPOSITIVOS MÁS UTILIZADOS

A continuación, se dividen estos dispositivos en sensores de monitorización de ruido y limitadores-registradores.

5.1. Sensores de monitorización de ruido

La instalación de redes de sensores alrededor del recinto y próximo a edificios residenciales es una de las soluciones tecnológicas más extendidas.

Permiten la medición continua desatendida, la integración con plataformas de análisis de datos e integración con herramientas de Big Data.

Además, permite doble conexión de datos en tiempo real mediante wifi y datos móviles.

Este tipo de soluciones aportan datos fiables en tiempo real y para su posterior análisis. Por tanto, sirven de control y como prueba de cumplimiento normativo. Así como prueba ante posibles demandas.



Ilustración 1 CESVA TA120

5.2. Limitadores-registradores

Tras años de uso obligatorio en discotecas y locales de ocio nocturno, se ha intensificado su uso como limitador, registrador o ambos en numerosos espectáculos en vivo de nuestro país. A veces por obligado cumplimiento y otras por prevención de posibles sanciones.

El dispositivo que se muestra a continuación, CESVA LF010, permite limitar el sistema de sonido a la vez que registra la actividad. Al disponer de transmisión telemática de datos, estos se pueden integrar en una única plataforma con los sensores anteriormente mencionados.



Ilustración 2 CESVA LF010

6. CASO DE ESTUDIO: MAD COOL 2023

La última noticia ha aparecido el 19 de septiembre de 2023 en eldiario.es [1]. El Ayuntamiento de Madrid impondrá 22.001 eurs de sanción a la empresa organizadora del festival por superar los niveles sonoros establecidos en la autorización del evento.

“Las actas de la Policía Municipal de Madrid a las que ha tenido acceso este periódico revelan que el ruido fue mayor al permitido en hasta al menos 19 ocasiones durante los días 6, 7, 8 y la madrugada del 9 de julio. Las superaciones sonoras tuvieron lugar en siete de sus ocho escenarios, que emitieron música por encima de los 100 decibelios. Además, también se lanzaron niveles elevados de ruido sobre la zona habitada de la Colonia Marconi en hasta cinco ocasiones, que son las que han originado las sanciones.”

A tenor de estas últimas informaciones, se puede observar un incumplimiento reiterado de la OPCAT.

Esta situación ya fue vaticinada por numerosas organizaciones vecinales, profesionales del sector y algunas instituciones. Se realizaron controles por parte de la productora y aún así estos no han sido suficientes y han desembocado en esta situación administrativa.

7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

La sociedad actual precisa de la innovación tecnológica, el avance legislativo y los avances en las posturas políticas para solventar esta situación.

El sector del espectáculo en vivo mueve millones de euros cada año, la demanda por parte del espectador cada vez es mayor. Pero también lo es la demanda de control y reducción acústica por parte de las zonas residenciales anexas.

Investigas nuevas técnicas que permitan mantener las limitaciones actuales, tales como la instalación de paneles acústicos temporales. El control del espacio y su entorno. Así como el establecimiento de una normativa uniforme y unas técnicas consensuadas que minimicen la incertidumbre y permitan desarrollar las actividades con total garantía legal, abogando por la calidad en la salud de los residentes.

8. CONCLUSIONES

Los profesionales de la acústica deben tomar un papel activo en la búsqueda de soluciones junto con las entidades y legisladores.

Se dispone de la tecnología suficiente para controlar los límites acústicos de cada espectáculo tanto en el recinto como en las inmediaciones. Sin embargo, precisa de un correcto tratamiento de los datos tanto en tiempo real como a posteriori para poder disponer de pruebas para la realización de informes periciales.

Es incongruente enfrentar a las partes, que se hayan realizado mediciones de control al parecer con poco éxito y que todo ello desemboque en sanción. Cuando lo ideal es la prevención de estas situaciones mediante estudios acústicos, diseño de soluciones y controles normativos de los niveles acústicos.

12. REFERENCIAS

[1] D.Casado “El Mad Cool, multado con 22.001 euros por el Ayuntamiento de Madrid al superar 19 veces los niveles máximos de ruido,” *eldiario.es*, septiembre 2023.

[2] M.El Mir y V.Bernaldo, “Las sanciones por ruido se multiplican por cuatro en Las Palmas de Gran Canaria”, RTVE, Canarias, abril 2023.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOFTWARES DE SIMULACIÓN DE RUIDO AMBIENTAL: COMPARACIÓN ENTRE UNA SOLUCIÓN COMERCIAL Y UNA DE CÓDIGO ABIERTO

Ignacio Soto Molina^{1,2*}

*Laura Simón Otegui*³

*Miguel Ausejo Prieto*³

*Rosa María Arce Ruiz*²

¹Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA-CEDEX), Madrid, España

²Centro de Investigación del Transporte, TRANSYT, Universidad Politécnica de Madrid, España

³Eurocontrol S.A.

RESUMEN

En esta comunicación técnica se comparan dos softwares de simulación de ruido ambiental, uno comercial (CADNA-A desarrollado por Datakustik GmbH) y el otro de código abierto y libre distribución (Noise Modelling, proyecto colaborativo desarrollado por UMRAE - Lab-STICC, Université Gustave Eiffel y CEREMA, entre otros colaboradores). El objetivo es analizar y comparar la precisión y funcionalidad actual del software libre en un escenario de simulación representativo de ruido de carreteras. La metodología propuesta comprende la selección del escenario, el diseño de éste en ambas plataformas y la ejecución de simulaciones. Los resultados se evalúan en términos de niveles de ruido en receptores y distribución espacial del ruido (isófonas). Se evalúa la similitud de resultados del software libre y el comercial, en el caso de estudio seleccionado de acuerdo al método común europeo CNOSSOS-EU. Se espera que este estudio proporcione información valiosa a profesionales y científicos a la hora de seleccionar las herramientas más adecuadas a sus necesidades. Consideramos también que puede impulsar el desarrollo y mejora de los softwares existentes en ambos ámbitos, y que los resultados y análisis obtenidos serán de interés para la comunidad científica y profesionales involucrados en la planificación urbana, gestión ambiental y salud pública.

Palabras Clave— Modelización de ruido, CNOSSOS-EU, software, código abierto.

ABSTRACT

In this technical communication, two environmental noise simulation software are compared, one of them commercial (CADNA-A developed by Datakustik GmbH) and the other open source and freely distributed (Noise Modelling, a collaborative project developed by UMRAE - Lab-STICC, Université Gustave Eiffel and CEREMA, among other contributors). The objective is to analyze and compare the current accuracy and functionality of free software in a representative road noise simulation scenario. The proposed methodology includes the selection of the scenario, its design on both platforms and the execution of simulations. The results are evaluated in terms of noise levels in receivers and spatial distribution of noise (isophones). The similarity of results of free and commercial software is evaluated in the selected study case, according to the common European method CNOSSOS-EU. This study is expected to provide valuable information to professionals and scientists when selecting the most appropriate tools for their needs. We also believe that it can promote the development and improvement of existing software in both areas (opensource and commercial software), and that the results and analysis obtained will be of interest to the scientific community and professionals involved in urban planning, environmental management, and public health.

Keywords— Noise modelling, CNOSSOS-EU, software, open source.

* **Autor de contacto:** ignacio.soto@cedex.es

Copyright: ©2023 Soto-Molina et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del ruido ambiental se puede realizar mediante dos técnicas básicas, la medición y la modelización. En el ámbito de la medición existen diversos procedimientos en función del fenómeno que se desea estudiar. Así, podemos realizar mediciones puntuales, periódicas, o continuas, entre otras.

Cuando se requieren estudios de grandes extensiones de territorio, por ejemplo, una aglomeración urbana, un ferrocarril, una carretera, o en situaciones en que la medición no es posible, se puede recurrir a la modelización acústica.

La modelización acústica es el proceso por el cual se evalúa el ruido ambiental provocado por una fuente o conjunto de fuentes, partiendo de la caracterización de dichas fuentes, del entorno acústico, y de un método de cálculo normalizado.

Dicho método de cálculo estará implementado en una herramienta informática (software de cálculo).

En España, desde el 31 de diciembre de 2018, fecha de la entrada en vigor de la *Orden PCI/1319/2018, de 7 de diciembre*, que incorpora al derecho interno la *Directiva 2015/996 de la Comisión, de 19 de mayo de 2015, por la que se establecen métodos comunes de evaluación del ruido*, el método de cálculo aplicable para los estudios que se realicen en cumplimiento de la Directiva 2002/49/CE, del Ruido, es el método CNOSSOS-EU (Common NOise aSSessment methOdS).

Existen diversas alternativas de software comercial y libre que han implementado completamente, o en parte, dicho método, a los que se es posible recurrir para la aplicación del mismo.

Para que un software, libre o comercial, sea considerado apto para la aplicación del método CNOSSOS-EU debe cumplir con las comprobaciones de conformidad recogidas en la norma ISO 17534-4:2020 [1]. Esta verificación se realiza por parte del programador o del fabricante.

En esta comunicación, se realiza un mismo estudio de ruido, con dos softwares diferentes, uno comercial (CadnaA) y otro libre (Noise Modelling [2]).

2. OBJETIVOS

Se pretende evaluar la consistencia de los resultados entre los softwares indicados, para la realización de un estudio concreto, teniendo en cuenta que el desarrollo del software comercial seleccionado ha tenido un recorrido mayor en el tiempo, y en cuanto a la implementación de diferentes métodos de cálculo.

El presente trabajo no prejuzga la superioridad de un software frente a otro. Asimismo, dado que solo se ha estudiado un escenario acústico, y una sola fuente de ruido, las conclusiones de este trabajo quedan circunscritas al caso de estudio seleccionado.

3. METODOLOGÍA

3.1. Ámbito de estudio

El ámbito de estudio es la carretera CV-336, en las inmediaciones de Ribarroja del Turia, entre las intersecciones con las carreteras CV-370 y la Carretera de L'Eliaña, a la altura del Molino del "Molinet".

El entorno acústico se ha seleccionado por contar con una combinación de zonas llanas, elevaciones, depresiones, edificios en diferentes ubicaciones respecto de la carretera y un viaducto sobre el río Turia.

3.2. Softwares

CadnaA® (Computer Aided Noise Abatement) es uno de los softwares comerciales más utilizados para la evaluación del ruido ambiental en España. Sus aplicaciones van desde zonas industriales, redes de carreteras y ferrocarriles, aeropuertos o aglomeraciones².

La versión de CadnaA utilizada en este estudio ha sido CadnaA 2022 MR2. El modelo ha sido construido y calculado por la empresa EUROCONTROL, S.A.

Noise Modelling es una herramienta gratuita y de código abierto diseñada para producir mapas de ruido ambiental en áreas urbanas, así como carreteras, ferrocarriles y mapas de fuentes industriales. Puede usarse como una biblioteca Java o controlarse a través de una interfaz Web.

Tal como se indica en su Web oficial³, puede ser utilizado libremente para investigación, educación o por expertos en un uso profesional.

Noise Modelling se ha utilizado en diferentes ámbitos académicos e institucionales [3]. Destaca la realización de los mapas estratégicos de ruido de carreteras del Gobierno francés, correspondientes a la cuarta fase de la Directiva de Ruido Ambiental, mediante la creación de una base de datos nacional, que alimenta el software Noise Modelling, y que permite la actualización periódica de dichos mapas [4].

La versión de Noise Modelling utilizada ha sido la versión 4.0.5 preliminar (aún no disponible para el público), correspondiente a la versión 4.0.4, con una modificación del algoritmo de simplificación topológica, o algoritmo de Ramer–Douglas–Peucker. Esta modificación ha surgido de consulta realizada a los desarrolladores del software, a raíz del presente trabajo.

² <https://www.datakustik.com/products/cadnaa/cadnaa>

³ <https://noisemodelling.readthedocs.io/en/latest/index.html>

De acuerdo a los respectivos desarrolladores, ambos softwares cumplen las comprobaciones de la norma ISO 17534-4:2020.

En adelante se utilizará la siguiente notación para referirse a los softwares utilizados:

- CadnaA: CNA
- Noise Modelling: NM

3.3. Fuente de ruido

La fuente de ruido modelada es la carretera CV-336, en el ámbito de estudio antes señalado.

Los datos de tráfico son comunes para ambos softwares, habiendo sido aportados por la empresa Eurocontrol SA. Se han aplicado todas las categorías del método CNOSSOS-EU, salvo la categoría nº5.

La superficie de rodadura seleccionada ha sido el pavimento de referencia, en ambos casos.

Se han considerado tramos de único y doble sentido de circulación, y una anchura de 3-4 metros por cada carril, según el tramo. En ambos softwares se han mantenido los mismos criterios.

La velocidad de circulación oscila entre 30 y 60 km/h dependiendo del tramo.

3.4. Edificaciones

La capa de edificios, con los datos de altura, han sido facilitados por la empresa Eurocontrol S.A. Se ha tenido en cuenta un coeficiente de absorción $\alpha=0,1$.

3.5. Modelo digital de terreno

El modelo digital del terreno (MDT) utilizado ha sido generado a partir de los datos LiDAR del CNIG, y tratado en el software CNA. El MDT generado en CNA se ha exportado a formato GIS, y tratado para su aplicación en NM.

NM presenta diferencias importantes en cuanto al tratamiento del MDT, respecto de CNA. Puede ser alimentado mediante un archivo ASCII o mediante capa de puntos (shp, geojson, etc.)

En este caso, el MDT procedente de CNA se ha convertido en una capa de puntos cada 2 metros, equivalente a un raster de 2x2 metros de tamaño de pixel.

Dado que, por el momento, NM no permite introducir estructuras tipo puente, en la zona del viaducto se ha modificado el MDT, generando una superficie, en lugar de una estructura.

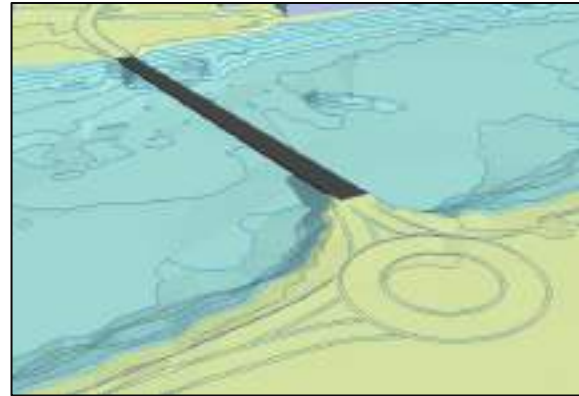


Figura 1: Viaducto en CNA

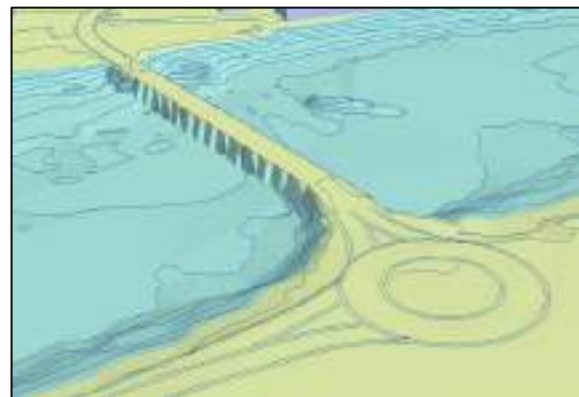


Figura 2: Viaducto en NM

3.6. Triangulación y mallas de cálculo

Los softwares seleccionados difieren en el sistema de triangulación y en la generación de la malla de cálculo.

Entendemos por triangulación la representación del modelo digital del terreno mediante una red irregular de triángulos, que permite la generación de un modelo continuo y la localización y definición geométrica de receptores virtuales, obstáculos, accidentes geográficos y, en general, los elementos que interfieren en la propagación del ruido.

El caso de CNA, la triangulación (irregular), y la malla de cálculo (regular) son independientes.

En el caso de NM, ambas mallas son la misma. NM dispone de varios sistemas de mallado, (aleatorio o random, regular y Delaunay). En este caso, se ha considerado que el mallado por Delaunay, ya que es el utilizado por el programa para generar las isófonas. Con los otros dos sistemas de mallado, se requiere el uso de GIS para la generación de estas.

Las figuras 3 y 4 muestran la triangulación del terreno generada por cada software, en la misma zona.

La triangulación en CNA no está condicionada por el tamaño de malla. En CNA la red es más tupida en las zonas donde existe una mayor densidad de datos, y más liviana en las áreas donde se dispone de menos datos a interpolar.

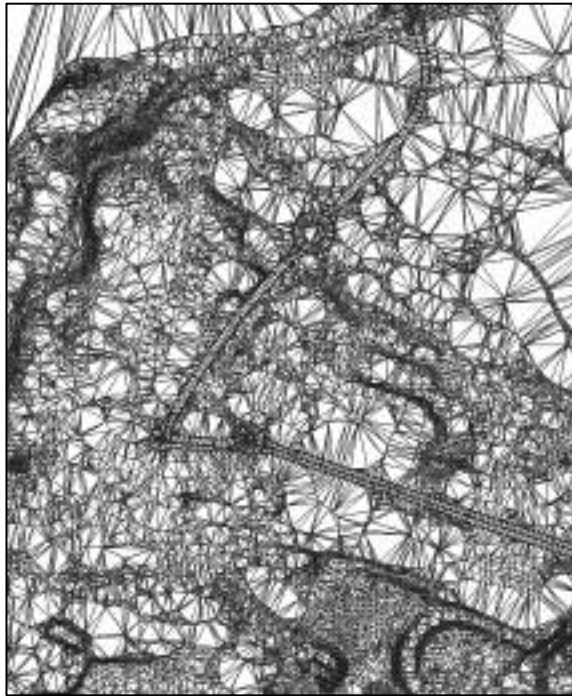


Figura 3: Triangulación del terreno de CNA

En el caso de NM, al coincidir ambas mallas, y estar condicionada la triangulación por el tamaño máximo de la malla de cálculo, genera una red de triángulos más densa en todo el dominio.



Figura 4: Triangulación del terreno NM

En cuanto a las mallas de cálculo (figuras 5 y 6), como se ha indicado antes, CNA genera una malla regular, mediante teselas de 5x5 metros, en este caso, asignando un receptor en cada vértice.

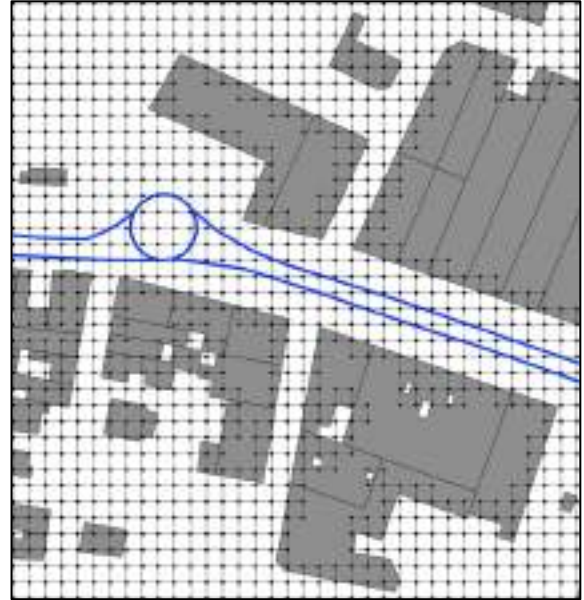


Figura 5: Malla de cálculo de CNA

NM, mediante la opción de mallado por Delaunay, genera una malla irregular de un máximo de 25 m².

NM, por defecto, establece un buffer de 2 metros alrededor de las edificaciones, que no es considerado para el mallado. Para el presente estudio este buffer se ha reducido a 0,1 metros.

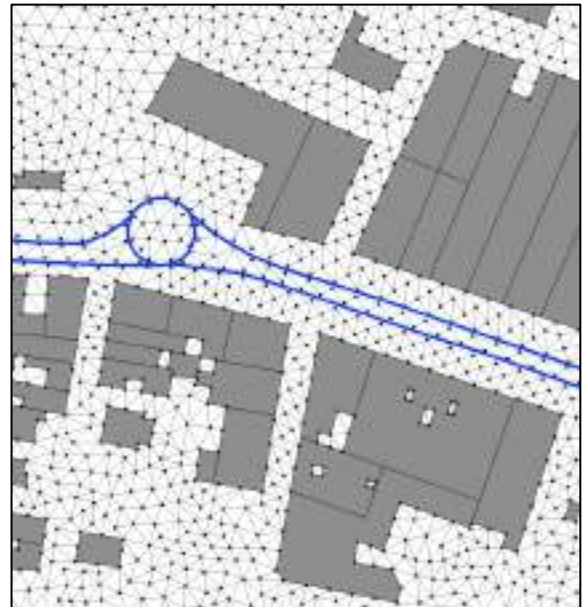


Figura 6: Malla de cálculo de NM

El software NM genera una malla algo más liviana que la de CNA, ya que existen receptores separados más de 5 metros, con el mismo criterio de tamaño de malla seleccionado (25 m²), lo que, en teoría, puede dar lugar a un cálculo más eficiente.

Existen parámetros para optimizar el tiempo de cálculo sin comprometer la calidad de los resultados [5]; sin embargo, este aspecto no se ha estudiado en la presente comunicación, ya que los modelos en ambos softwares han sido calculados en equipos diferentes, sin poder establecer una comparación cuantitativa.

3.7. Receptores de fachada

Los receptores mencionados hasta el momento se corresponden con los que utilizan ambos softwares para el cálculo del mapa de ruido.

Los receptores de fachada, para la evaluación de la población expuesta, requieren un segundo cálculo y responden a condicionantes diferentes.

Ambos softwares tienen implementado el algoritmo de generación de receptores de acuerdo con el método CNOSSOS-EU.

CNA dispone de varios sistemas, los correspondientes al Anexo II del Real Decreto 1513/2005, y otros. En el caso de que se seleccione el método de la mediana para el cálculo de población expuesta, se realiza un proceso interno.

NM implementa dos sistemas de generación de receptores en edificios. Uno para la generación de receptores a una sola altura, y el segundo para la generación de receptores a varias alturas. La generación de receptores se realiza a intervalos regulares (Caso 2 recogido en el Anexo II del R. D. 15313/2005).

El método de la mediana no se encuentra implementado en NM. Sin embargo, permite la aportación de receptores de fachada por el usuario, por lo que, en este caso, se han utilizado los mismos receptores generados en CNA en ambos cálculos.

3.8. Absorción del terreno

Se ha generado una capa GIS con los valores de absorción del terreno. En ambos modelos se ha aportado la misma información en cuanto al parámetro de absorción G.

3.9. Condiciones favorables de propagación y meteorológicas

En ambos casos se han utilizado las siguientes condiciones de propagación favorable: Ld: 50%, Le: 75%, Ln: 100% (valores recomendados por defecto). Se ha considerado una temperatura de 18°C y humedad del 63%.

3.10. Comparación de resultados del cálculo

La comparación de resultados se realiza con el indicador Lden. La comparación consiste en:

- Comparación visual de mapa de ruido
- Comparación mediante puntos de control
- Comparación de resultados en receptores de fachada
- Cálculo de población expuesta

4. RESULTADOS

4.1. Comparación visual de mapas de ruido

La comparación de los mapas de ruido calculados con cada software presenta similitudes y diferencias, según la zona de la que se trate. En las zonas sensiblemente llanas, y en las afectadas por edificaciones, ambos mapas son muy similares.

Las mayores diferencias se aprecian en la zona del viaducto sobre el río Turia. Estas diferencias se deben, posiblemente, a que en NM no se ha implementado el elemento puente. Por tanto, los fenómenos de atenuación y difracción que este elemento genera en CNA no pueden ser emulados en NM.

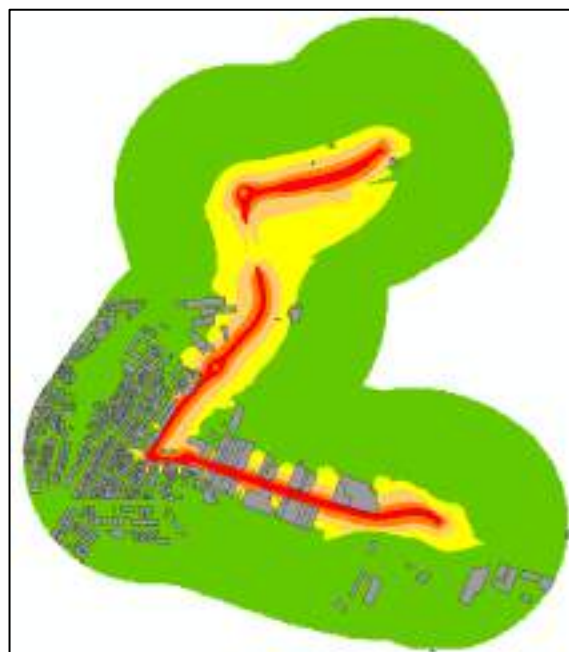


Figura 7: Resultado Lden CNA



Figura 8: Resultado Lden NM

4.2. Comparación mediante puntos de control

Se han establecido un total de 493 puntos de control, mediante una malla regular de 50x50 metros, en el dominio de cálculo.

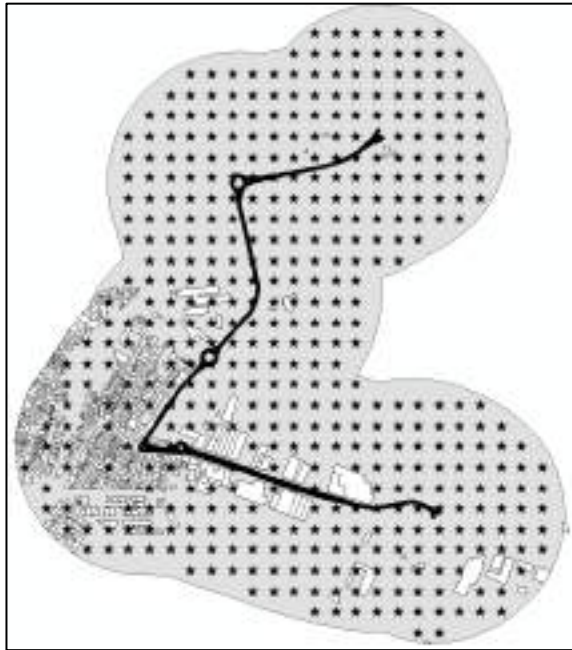


Figura 9: Puntos de control

A cada punto de control se le ha asignado el valor resultante del cálculo de Lden, en ambos softwares, obteniendo pares de datos en cada punto. No se han tenido en cuenta puntos coincidentes con edificaciones, ni puntos en el borde del dominio de cálculo, que pudieran desvirtuar el análisis.

La figura nº10 muestra la correlación lineal entre los resultados Lden de CNA y de NM, con un coeficiente de correlación r de Pearson superior a 0,97.

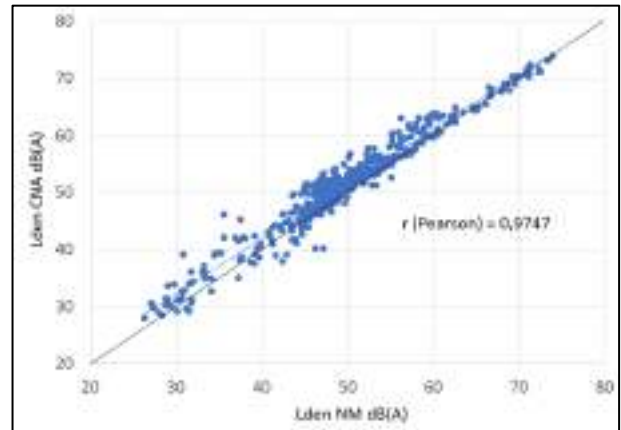


Figura 10: Correlación Lden CNA y NM en puntos de control

Se han estudiado también los estadísticos máximo, mínimo, media y desviación estándar para el caso de CNA, NM, y para la diferencia entre ambos (CNA-NM). Los valores de la tabla nº1 correspondientes a la diferencia (CNA-NM) se calculan a partir de una capa ráster resultante de restar a los niveles Lden obtenidos con CNA, los obtenidos con NM.

Tabla 1: Comparación de estadísticos de Lden en los puntos de control.

	CNA (dBA)	NM (dBA)	CNA-NM (dB)
Máximo	73,92	73,82	7,22
Mínimo	26,27	27,78	-10,27
Media	49,43	50,91	-1,48
Desv. STD	9,11	8,94	2,03

En la figura 11 se representan las diferencias entre CNA y NM. Los valores negativos (paleta de color de azul a amarillo), indican las áreas donde NM arroja resultados superiores a CNA. Los valores positivos (paleta de color de naranja a rojo), indican las áreas donde CNA arroja valores superiores.

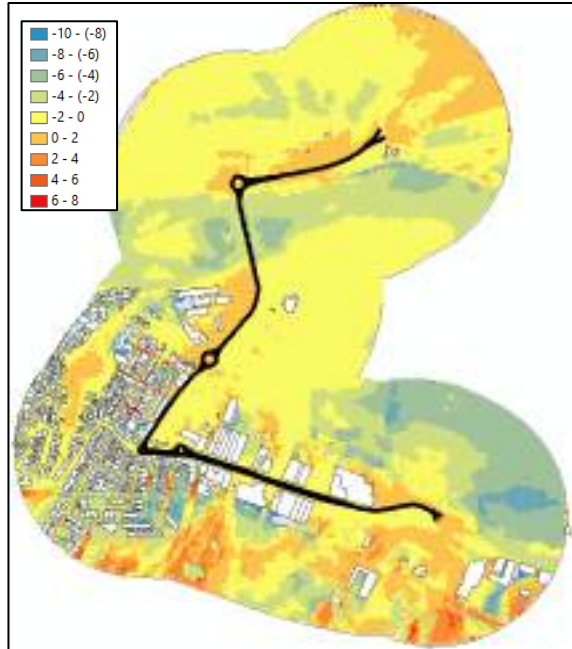


Figura 11: Mapa de diferencia CNA-NM en dB

Se observa que en la mayoría de las zonas (amarillo y naranja), las diferencias son inferiores a 2 dB en valor absoluto.

4.3. Comparación de resultados en receptores de fachada

La figura nº12 muestra la correlación lineal entre los resultados Lden en receptores de fachada de CNA y de NM, con un coeficiente de correlación r de Pearson también superior a 0,97.

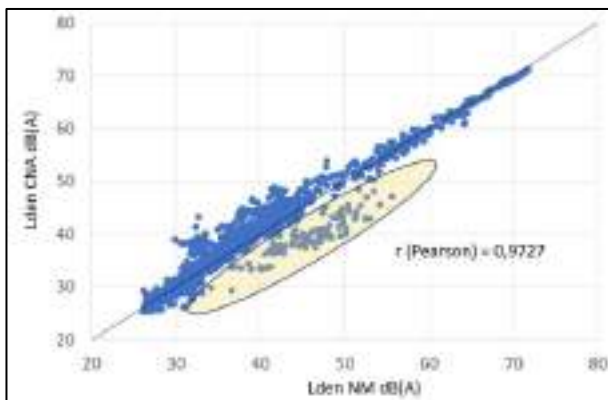


Figura 12: Correlación Lden CNA y NM en receptores de fachada

En este caso, se observa una dispersión algo mayor a la de los puntos de control (figura 10), con un grupo de pares de datos claramente desplazado hacia el eje de NM, que evidencia receptores de fachada a los que NM asigna un nivel

de ruido superior. Estos receptores suponen menos del 5% del total (166 de 3702).

Al igual que en el caso de los puntos de control, se han estudiado los estadísticos máximo, mínimo, media y desviación estándar para los receptores de fachada de CNA, NM, y la diferencia entre ambos (CNA-NM).

El valor CNA-NM corresponde a los estadísticos receptor a receptor.

Tabla 2: Comparación de estadísticos de Lden en los receptores de fachada.

	CNA (dBA)	NM (dBA)	CNA-NM (dB)
Máximo	71,80	71,01	10,16
Mínimo	26,10	25,21	-10,46
Media	37,10	37,46	-0,35
Desv. STD	9,15	9,15	2,13

La mayor parte de los receptores presentan diferencias inferiores a 2 dB en Lden. Las diferencias máximas y mínimas son del orden de 10 dB. Los receptores que presentan las mayores diferencias suponen una proporción pequeña del conjunto y se localizan mayoritariamente en segunda fila de los edificios, apantallados, o en zonas con elevado número de reflexiones (figura nº13).

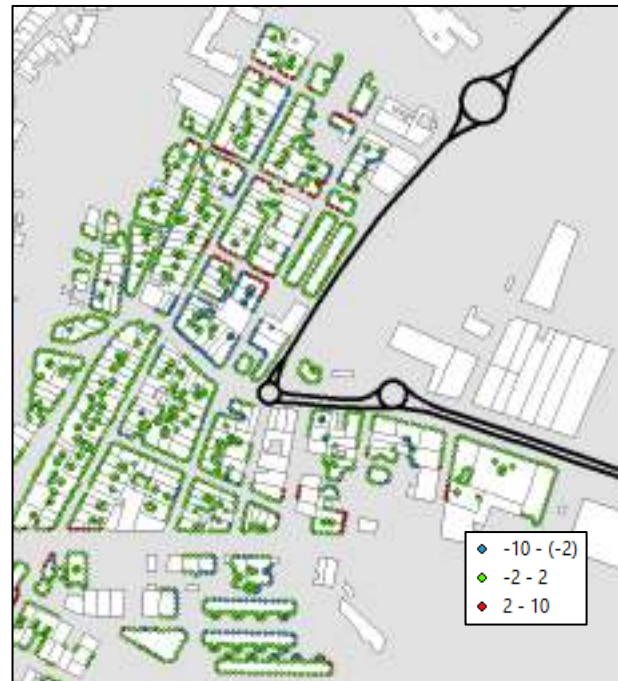


Figura 13: Diferencias en receptores de fachada. Lden

Las diferencias observadas, en el caso de los receptores de fachada, pueden deberse al tratamiento diferencial de las reflexiones, así como de las difracciones en elementos horizontales y verticales del escenario acústico.

4.4. Cálculo de población expuesta

La tabla nº3 muestra las diferencias en el cálculo de la población expuestas, obtenida a partir de los valores de Lden en receptores de fachada.

Tabla 3: Comparación de resultados de población expuesta.

dB(A)	Población		
	CNA	NM	CNA-NM
<55	1665	1660	5
55-59	45	46	-1
60-64	33	31	2
65-69	74	80	-6
70-74	19	12	6
>75	0	0	0

Se observa que la población expuesta a niveles altos de ruido (>65 dBA Lden) es de 93 personas en el caso de CNA, y 92 personas en el caso de NM. Los resultados en los intervalos menores a 65 dB(A) son prácticamente idénticos en ambos softwares.

5. DISCUSIÓN

En el ámbito de la acústica ambiental existe un interés permanente en la comparación de los resultados de distintas alternativas de software disponibles [6], así como de los distintos métodos de cálculo existentes [7], [8].

Por otro lado, es generalizado el interés en la comunidad técnica y científica por el desarrollo de herramientas de software libre de forma colaborativa, con ejemplos tan relevantes como QGIS, o el propio Noise Modelling, en el ámbito del ruido ambiental. Este interés se extiende también a la administración pública, con el objeto de avanzar en el uso eficiente de los recursos públicos.

Aunque los softwares de ruido disponibles declaren cumplir con los criterios de comprobación de la norma ISO 17534, existen aspectos de la programación que pueden interferir en los resultados, como son los algoritmos de triangulación de la malla, la posición de los receptores considerados [9], o los algoritmos de curvado y rasterización del mapa de ruido [10], [11].

Existen otras diferencias que pueden afectar al resultado de un mapa de ruido, incluso considerando los mismos parámetros en diferentes softwares, como son los formatos de entrada de los datos y las diferentes operaciones que el software realiza a partir de ellos [12]–[14].

Todo ello puede dar lugar a pequeñas desviaciones en el resultado de los mapas y en el cálculo de la población expuesta cuando se aplican distintos softwares al mismo modelo, sin que ello implique que se pueda considerar uno más preciso que otro. Esta disquisición requeriría de estudios mucho más profundos que el presente.

Las diferencias en los resultados del cálculo del mismo modelo con CNA y NM obtenidas en el presente estudio se encuentran dentro del rango de lo razonable, teniendo en cuenta otros estudios similares, y el diferente comportamiento que presentan ambos softwares en cuanto al tratamiento del modelo digital del terreno, el mallado y la generación de receptores.

En este sentido, la comparación realizada en las tablas 1 y 2 indica diferencias globalmente bajas en los resultados obtenidos por CNA y NM, con una diferencia media de -1,48 dB en el mapa del índice Lden, y de -0,35 dB en receptores de fachada. Sin embargo, existen diferencias puntuales de hasta 10 dB en algunas zonas del mapa, que merecerían un estudio más pormenorizado.

6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que este estudio se ha realizado en una única fuente de ruido (carreteras), y un único escenario acústico, no se pueden obtener conclusiones generales.

No obstante, circunscribiéndonos al ámbito de estudio, se puede indicar que los resultados de ambos softwares son similares y que el estudio se podría haber realizado indistintamente con cualquiera de los dos.

Las mayores diferencias, localizadas en la zona del viaducto, se deben a que el elemento puente no ha sido implementado en NM.

Se puede concluir que, por el momento, NM no sería adecuado para el estudio de detalle de zonas en las que se requiera conocer con precisión los niveles de ruido en las inmediaciones de un viaducto, o estructura similar.

A nivel estratégico, NM puede ser una alternativa adecuada para la realización de mapas estratégicos de ruido similares al caso de estudio del presente trabajo, sin perjuicio de que estudios de mayor nivel de detalle puedan requerir herramientas con un nivel de desarrollo más avanzado.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Pierre Aumond y Nicolas Fortin (Université Gustave Eiffel, CEREMA, UMRAE), su disposición para la aclaración de dudas, y resolución de problemas, en la aplicación del software Noise Modelling.

8. REFERENCIAS

- [1] ISO/TR 17534-4, “Software for the calculation of sound outdoors — Part 4: Recommendations for a quality assured implementation of the Commission Directive (EU) 2015/996 in software according to ISO 17534-1,” *Serie de normas ISO de la Organización Mundial de Estandarización*. 2020.

- [2] E. Bocher, G. Guillaume, J. Picaut, G. Petit, and N. Fortin, “NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 8, no. 3, p. 130, Mar. 2019, doi: 10.3390/ijgi8030130.
- [3] UMRAE - Lab-STICC, “Noise Modelling software Scientific production,” 2022. https://noisemodelling.readthedocs.io/en/latest/Scientific_production.html (accessed Aug. 24, 2023).
- [4] P. Aumond *et al.*, “Strategic noise mapping in France to 2023: Coupling a national database with the open-source software NoiseModelling,” Aug. 2022.
- [5] A. Tévar, M. Ausejo, L. Simón Otegui, and R. Morales, “Benchmark tests to decide the best technology to be applied in large strategic noise mapping,” Aug. 2019.
- [6] A. Balderrama, D. Arzmann, and J. Schulz, “Review of commercial software tools for facade acoustics,” *ce/papers*, vol. 4, no. 6, pp. 465–472, Dec. 2021, doi: 10.1002/cepa.1646.
- [7] S. Curcuruto *et al.*, “A comparison of noise simulation models,” in *17th International Congress on Sound and Vibration 2010, ICSV 2010*, Aug. 2010.
- [8] M. Fallah-Shorshani, X. Yin, R. McConnell, S. Fruin, and M. Franklin, “Estimating traffic noise over a large urban area: An evaluation of methods,” *Environ Int*, vol. 170, p. 107583, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envint.2022.107583.
- [9] I. Soto Molina, F. Segués Echezarreta, and R. Arce Ruiz, “Análisis de sensibilidad en el cálculo de población expuesta en los mapas estratégicos de ruido de la cuarta fase, en función de los métodos propuestos por la directiva delegada (UE) 2021/1226 para la distribución de población en receptores.,” Madrid (España): CONAMA 2022.
- [10] C. Asensio, M. Ruiz, I. Pavón, M. Ausejo, and M. Recuero, “Uncertainty in Noise Maps Isolines: The Effect of the Sampling Grid,” *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, Vol. 97, 237 – 242, vol. 97, Aug. 2011, doi: 10.3813/AAA.918403.
- [11] C. Asensio, M. Recuero, M. Ruiz, M. Ausejo, and I. Pavón, “Self-adaptive grids for noise mapping refinement,” *Applied Acoustics*, vol. 72, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.apacoust.2010.12.007.
- [12] P. Aumond, A. Can, V. Mallet, B. Gauvreau, and G. Guillaume, “Global sensitivity analysis for road traffic noise modelling,” *Applied Acoustics*, vol. 176, p. 107899, May 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107899.
- [13] M. Ausejo, M. Recuero, C. Asensio, I. Pavón, and R. Pagán Muñoz, “Study of Uncertainty in Noise Mapping,” in *39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010*, Aug. 2010.
- [14] S. Shilton, N. Jones, A. Stimac, and M. Ausejo, “Improving consistency through quality control with a large strategic noise mapping project,” in *Internoise 2013. Innsbruck, Austria*.

ESTIMACIÓN DE LA AFECCIÓN POR RUIDO DE CARRETEAS EN LOS ESPACIOS DE LA RED NATURA 2000 EN LA ESPAÑA PENINSULAR, Y DETERMINACIÓN PRELIMINAR DE SUPERFICIES CON POTENCIAL PARA LA DECLARACIÓN DE RESERVAS DE SONIDOS DE ORIGEN NATURAL

Ignacio Soto Molina^{1,2*}
Rosa María Arce Ruiz²

¹Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA-CEDEX), Madrid, España

²Centro de Investigación del Transporte, TRANSYT, Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

El informe (EEA 22/2019) de ruido ambiental en Europa, destaca que “(...) se estima que alrededor del 19 % de los espacios Natura 2000 se encuentran en zonas consideradas ruidosas. Por lo tanto, vale la pena considerar la preservación de las condiciones acústicas naturales para limitar la pérdida de biodiversidad.” Esta estimación se realiza a partir del índice “*Quietness Suitability Index*”, mediante algoritmos de proximidad a las fuentes de ruido.

En este trabajo se estima la afección potencial por ruido en la RN2000 de la España peninsular, mediante un modelo de ruido a gran escala, considerando el ruido viario, principal fuente de ruido en el ámbito de END. Se estiman las superficies RN2000 potencialmente afectadas y su nivel de ruido.

Supone un primer paso en la identificación Reservas de Sonidos de Origen Natural, que, de acuerdo con la Ley del Ruido española, corresponden con “zonas en las que la contaminación acústica producida por la actividad humana no perturbe dichos sonidos”. Se discute también la conveniencia de la zonificación de estos espacios como áreas acústicas “tipo g”.

La definición y protección de estas zonas puede contribuir al cumplimiento de los objetivos de las Estrategias de Biodiversidad, europea y española.

Palabras Clave— Modelización de ruido, CNOSSOS-EU, espacios protegidos, reservas de sonidos de origen natural.

ABSTRACT

The report (EEA 22/2019) on environmental noise in Europe highlights that “(...) it is estimated that around 19% of Natura 2000 spaces are located in areas considered noisy. Therefore, it is worth considering the preservation of natural acoustic conditions to limit biodiversity loss.” This estimate is made from the “*Quietness Suitability Index*”, using proximity algorithms to noise sources.

In this work, the potential effect of noise in the RN2000 of mainland Spain is estimated, using a large-scale noise model, considering road noise, the main source of noise in the field of END. The potentially affected RN2000 surfaces and their noise level are estimated.

It is a first step in the identification of Reserves of Natural Origin Sounds, which, according to the Spanish Noise Law, correspond to “areas in which noise pollution produced by human activity does not disturb said sounds”. The convenience of zoning protected areas as “type g” acoustic areas (areas requiring special protection against noise) is also discussed.

The definition and protection of these areas can contribute to the fulfillment of the objectives of the European and Spanish Biodiversity Strategies.

Keywords— Noise modelling, CNOSSOS-EU, protected areas, reserves of natural origin sounds.

* **Autor de contacto:** ignacio.soto@cedex.es

Copyright: ©2023 Soto-Molina et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido, entendido como un sonido no deseado de origen antrópico, y que genera una molestia o perturbación en los seres humanos [1], es también una fuente de impacto en los ecosistemas naturales y, particularmente, en la fauna [2].

La Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental (en adelante END), tiene por objeto “establecer un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias, de la exposición al ruido ambiental”.

Su ámbito de aplicación incluye únicamente “el ruido ambiental al que estén expuestos los seres humanos (...)”.

Sin embargo, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), contempla los efectos del ruido en el medio natural, en los informes quinquenales a que se refiere el Artículo 11 de la END. Así, en el informe EEA 2020/229 de ruido ambiental en Europa [3], se refiere a los efectos del ruido en la vida silvestre, dedicando su capítulo 5 a los impactos sobre la biodiversidad, indicando que “(...) se estima que alrededor del 19 % de los espacios Natura 2000 se encuentran en zonas consideradas ruidosas. Por lo tanto, vale la pena considerar la preservación de las condiciones acústicas naturales para limitar la pérdida de biodiversidad.”

Esta estimación se ha realizado considerando aquellas áreas que presentan un QSI (Quietness Suitability Index, traducido como “Índice potencial de zonas tranquilas”) inferior a 50 [4], [5], siendo cero el nivel más bajo de calidad, y 100 el más alto posible. En algunos documentos el índice QSI se expresa de 0 a 1.

END se traspone y desarrolla en el Reino de España a través de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido (en adelante LR), cuyo objeto y finalidad es “prevenir, vigilar y reducir la contaminación acústica, para evitar y reducir los daños que de ésta pueden derivarse para la salud humana, los bienes o el medio ambiente”, y por el Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, que desarrolla la LR.

La LR incluye en su ámbito de aplicación la prevención, vigilancia y reducción de la contaminación acústica en las áreas naturales sensibles al ruido, mediante dos figuras:

1. Áreas acústicas tipo “g” (en adelante AG) definidas como “Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica”.

2. Reservas de sonidos de origen natural (en adelante RSON), que incluye aquellas zonas naturales donde “la contaminación acústica producida por la actividad humana no perturbe dichos sonidos”.

La competencia para determinar qué espacios requieren una protección especial contra la contaminación acústica (AG), o deben ser objeto de reserva para la preservación de los sonidos de origen natural (RSON) es, en la mayoría de los casos, de las comunidades autónomas, a iniciativa de los gestores de dichos espacios, caso por caso, si bien, las

autoridades competentes para elaborar los mapas de ruido y planes de acción deben contemplarlos.

En España, estas dos figuras de protección del medio natural frente al ruido no han sido desarrolladas, y cuentan con una legislación básica poco precisa. El resultado es que no están siendo convenientemente implementadas ni en la planificación territorial y urbanística ni en los instrumentos que la LR prevé para gestionar la contaminación acústica, siendo necesario un desarrollo mayor [6], [7].

Ambas figuras (AG y RSON) implican un intento de proteger las zonas naturales del ruido, desde diferentes enfoques.

Las AG forman parte de la zonificación acústica, que deben realizar las administraciones competentes. Su designación implica el establecimiento de objetivos de calidad acústica (en adelante OCAs) y, en su caso, de medidas en los Planes de Acción contra el Ruido (PAR), cuando se detecte un conflicto acústico.

Desde el punto de vista de la normativa vigente, los OCA para las AG no se fijan de manera genérica (tabla A del Anexo II del RD1367/2007). Deberían fijarse cuando “requieran una especial protección contra la contaminación acústica” (art.7.1.g de la LR), teniendo en cuenta “la sensibilidad de la fauna y de sus hábitats” (art.8.2 de la LR), y “se establecerán para cada caso en particular, atendiendo a aquellas necesidades específicas de los mismos que justifiquen su calificación” (art.14.3 del RD 1367/2007).

La superación de los OCAs en cualquier área acústica se tiene en cuenta en la definición de las medidas y acciones prioritarias a desarrollar en los Planes de Acción (art.10 del RD 1513/2005), y las administraciones competentes podrían emplear las herramientas disponibles en la regulación para conducir los niveles sonoros hacia los objetivos de calidad acústica (Capítulo III de LR).

En el caso de las RSON, se pretende proteger el sonido natural en ellas presente, no perturbado por la acción humana. No implica el establecimiento de OCAs sino, en su caso, de evitar o reducir el efecto perturbador que el ruido antrópico tiene en las condiciones sonoras naturales, es decir, en su paisaje sonoro [8].

A su vez existe una relación evidente entre AG y RSON. Las RSON deberían ser consideradas como áreas que requieren protección especial frente al ruido (AG), ya que se trataría de zonas que conservan una calidad acústica alta, que debe ser preservada.

Por su parte, las AG no tienen por qué ser consideradas RSON, si bien su OCA puede ser alcanzar una calidad acústica próxima a la que tendría una RSON o, al menos, no empeorar la calidad acústica existente.

Por lo tanto, existen varias cuestiones a las que debe darse respuesta. Por ejemplo, ¿qué zonas deben considerarse AG?, ¿qué zonas deben considerarse RSON?, ¿qué criterios se deben aplicar?.

Diferentes autores proponen criterios para la designación de estas figuras de protección [6], [7], [9]–[11].

Deberían ser consideradas AG, aquellas áreas naturales, en particular los espacios protegidos, en las que la calidad ambiental dependa, al menos en parte, de la calidad acústica.

En cuanto al establecimiento de OCAs de las AG, el criterio técnico más aceptado es la asignación en función de la sensibilidad de los receptores presentes, en particular los diferentes grupos de fauna, ya que la fauna, tanto terrestre [12]–[14] como marina [15], es el elemento o factor natural que, de forma más evidente, se ve afectado por el ruido.

El OCA de las AG, para nivel de ruido aportado por la actividad humana podría proponerse, no como un valor absoluto (40 dBA p.e.), sino como un valor relativo. Por ejemplo, no incrementar en más de 6 dBA el nivel de fondo en condiciones naturales. Este es el enfoque que propone la *Ley 16/2002 de protección contra la contaminación acústica de Cataluña*², aunque esta Ley lo aplica a las “Zona d'especial protecció de la qualitat acústica”, que se corresponderían con las AG de la LR.

En el caso de las RSON los criterios son más dispares y tienden a confundirse con las AG, mediante la asignación de OCAs. La LR es clara en este aspecto indicando que “*podrán establecerse planes de conservación de las condiciones acústicas de tales zonas o adoptarse medidas dirigidas a posibilitar la percepción de aquellos sonidos*”. En ningún caso se habla de OCAs para las RSON.

En este sentido, las RSON deberían declararse cuando exista la evidencia de zonas prístinas en cuanto a la contaminación acústica, es decir, no perturbadas por sonidos de origen antrópico.

Este enfoque, aunque en distinto ámbito, es el aplicado, por ejemplo, por la legislación de aguas³ para la declaración de las Reservas Naturales Hidrológicas, que corresponden a “*determinados ríos, tramos de ríos, acuíferos o masas de agua para su conservación en estado natural*”.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son:

- Avanzar en el desarrollo de una metodología adecuada para la evaluación del ruido a gran escala en espacios protegidos.
- Evaluar, de forma preliminar, el efecto del ruido ambiental en los espacios de la Red Natura 2000.
- Discutir la necesidad de desarrollar los instrumentos (AG y RSON) que la LR prevé para la protección frente al ruido de los espacios protegidos.
- Realizar una primera identificación de zonas susceptibles de ser consideradas RSON.

² <https://portaljuridic.gencat.cat/eli/es-ct/l/2002/06/28/16>

³ <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-13042&p=20150721&tn=1#a25>

3. METODOLOGÍA

3.1. Ámbito de estudio

El ámbito de estudio seleccionado, para esta primera aproximación, es la España peninsular, y los espacios de la Red Natura 2000 terrestres en ella presentes.

3.2. Software

Se utiliza el software Noise Modelling [16] (en adelante NM). NM es una herramienta gratuita y de código abierto diseñada para producir mapas de ruido ambiental en áreas urbanas, así como carreteras, ferrocarriles y mapas de fuentes industriales.

Tal como se indica en su sitio Web oficial⁴, puede ser utilizado libremente para investigación, educación o por expertos en un uso profesional.

NM se ha utilizado en diferentes ámbitos académicos e institucionales [17]. Destaca la realización de los mapas estratégicos de ruido de carreteras del Gobierno francés [18], correspondientes a la Cuarta Fase de END, mediante la creación de una base de datos nacional, que alimenta el software NM, y que permite la actualización periódica de dichos mapas [19].

La versión de NM utilizada en este estudio ha sido la 4.0.3. De acuerdo a los desarrolladores, este software cumple con las comprobaciones de la norma ISO 17534-4:2020⁵, para la aplicación del método CNOSSOS-EU.

3.3. Elaboración del mapa de ruido

En la elaboración del mapa de ruido se ha recurrido a las siguientes fuentes de datos:

- Cartografía de aforos de carreteras de la Dirección General de Carreteras del MITMA del año 2019 [20].
- Cartografía de carreteras de la Base Topográfica Nacional 1:100.000 (BTN100) y Modelo Digital del Terreno 200x200 (MDT200) del Centro Nacional de Información Geográfica [21].

Las carreteras consideradas, además de las correspondientes a la Red de Carreteras del Estado, son las clasificadas como autovías, autopistas, carreteras principales, secundarias y terciarias en la cartografía BTN100.

La asignación de tráfico a las carreteras de las que no se dispone de datos se ha realizado de acuerdo a las recomendaciones de la guía “*Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure*” [22].

La malla de receptores se ha obtenido mediante una cuadrícula regular de 200x200 metros. Previamente a la

⁴ <https://noisemodelling.readthedocs.io/en/latest/index.html>

⁵ <https://noisemodelling.readthedocs.io/en/latest/Validation.html>

selección de este tamaño de cuadrícula se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad mediante cálculos en zona experimental.

En dicho análisis se evaluaron los resultados obtenidos con cuadrícula de 50x50, 100x100 y 200x200 metros, llegando a la conclusión de que, si bien al incrementar el tamaño de la cuadrícula se pierde resolución, el límite de las isófonas, cada 5 dB(A), permanece sensiblemente constante, a la escala de estudio. La cuadrícula de 200x200m permite reducir el tiempo de cálculo del modelo, con suficiente resolución para el objeto de este trabajo.

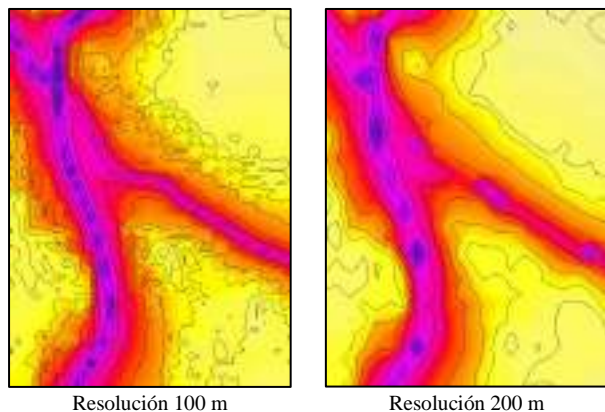


Figura 1: Comparación de resultados del mapa de ruido con diferentes resoluciones de mallado.

La distancia máxima entre receptor y fuente considerada es de 15 km. En este aspecto, existe controversia sobre cuál es la distancia máxima a la fuente que se puede considerar válida en la aplicación del método CNOSSOS-EU.

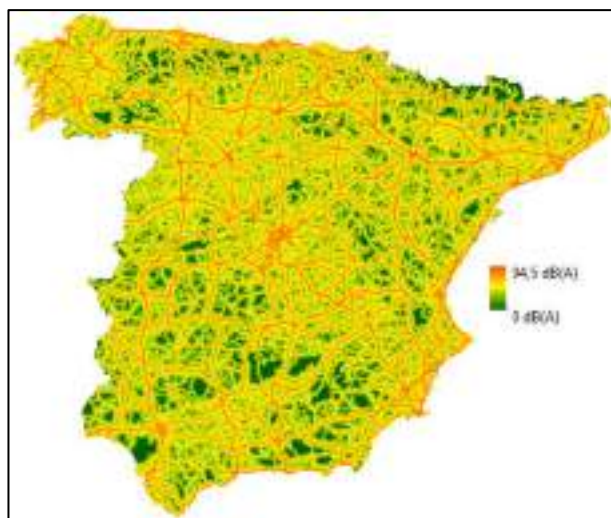


Figura 2: Mapa de niveles Lden dB(A)

En el documento de Stylianos Kephelopoulos *et al.*, 2012 [23] se indica una distancia inferior a 800 metros. No obstante, con posterioridad a dicha publicación, el método

CNOSSOS-EU ha sido corregido [24], el método de propagación se basa en la norma ISO 9613-2:1996 [25], [26], que no establece límite de distancia, y los softwares de ruido permiten la modificación de la distancia máxima fuente-receptor estableciendo, algunos de ellos, distancias por defecto de hasta 3 km.

Se considera que, al estar fundamentado el método de propagación en una divergencia esférica, y atenuaciones y correcciones debidas a condiciones atmosféricas y ambientales, es adecuado para el objeto de este estudio.

No obstante, este extremo, en distancias tan elevadas como las consideradas aquí, debería evaluarse con más detenimiento, incluso con la realización de mediciones, o comparación con otros métodos de cálculo comúnmente aceptados.

3.4. Espacios protegidos

La cartografía de espacios de la Red Natura 2000 (en adelante RN2000) se obtiene de la Infraestructura de Datos Espaciales del MITECO [27].

En dicha cartografía se distinguen tres tipos de superficies (LIC, ZEPA y LIC+ZEPA). Se ha procedido a la disolución de todas las superficies en un solo polígono, de forma que se obtiene la superficie Red Natura 2000 total en el ámbito de estudio.

3.5. Umbrales considerados

Para la determinación de los umbrales y rangos de estudio de este trabajo, se han considerado los criterios que se exponen a continuación.

La identificación de las potenciales RSON, se ha realizado mediante selección aquellas zonas con valores nulos de ruido provocado por infraestructuras viarias, de acuerdo al modelo calculado.

Para la determinación de los rangos de afección en el resto de superficies se consideran los rangos <15 dB(A), 15-35 dB(A) y >35 dB(A) obtenidos de Soto-Molina *et al.*, 2022 [11].

Además, se considera el rango >55dB(A) para mantener la coherencia con el informe EEA Report No 22/2019 [3] de la Agencia Europea del Medio Ambiente. Este umbral es considerado como “ruidoso”, y se relaciona con un valor de QSI <0,5.

Por tanto, los umbrales considerados son:

- Ausencia de ruido (0 dB(A)): áreas susceptibles de ser declaradas RSON
- Rangos de afección por ruido a espacios protegidos de la Red Natura 2000 (candidatos a AG):
 - o <15 dB(A)
 - o 15-35 dB(A)
 - o 35-55 dB(A)
 - o >55 dB(A)

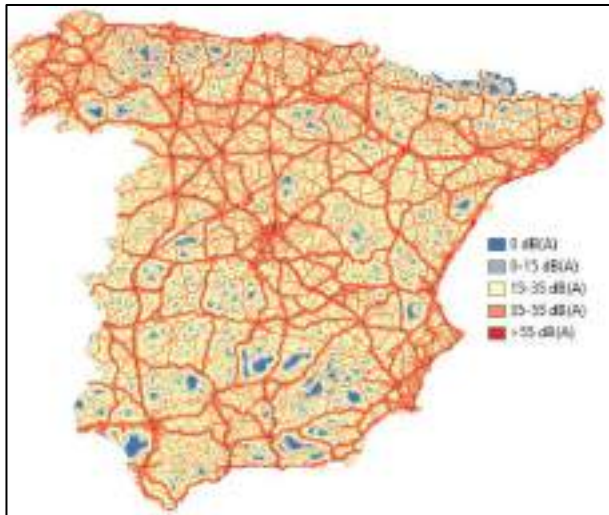


Figura 3: Mapa de umbrales considerados

3.6. Evaluación de resultados

Se han obtenido los siguientes aspectos:

- Nivel de ruido en la España peninsular
- Nivel de ruido en espacios Red Natura 2000
- Superficies susceptibles de ser declaradas RSON

4. RESULTADOS

4.1. Nivel de ruido en la España peninsular

La tabla nº1 muestra el nivel de ruido teórico, aportado por las infraestructuras viarias consideradas que, de acuerdo al modelo generado, existe en la España peninsular.

Tabla 1: Niveles de ruido en la España peninsular

Estadístico	dB (A)
Máximo	94,50
Mínimo	0,00
Media	35,47
Desviación STD	14,33

En la tabla nº2 se clasifican los datos de la tabla anterior en función de los rangos de ruido considerados, aportando información sobre la proporción de superficie afectada en cada rango.

Tabla 2: Afección por ruido de carreteras en la España peninsular

Rango	Superficie (miles Ha)	Superficie (%)
0 dB(A)	801,72	1,62%
0-15 dB(A)	3.022,47	6,12%
15-35 dB(A)	19.957,94	40,43%
35-55 dB(A)	20.944,75	42,43%
>55 dB(A)	4.641,73	9,40%
TOTAL	49.368,61	100%

Las superficies sin perturbación potencial por ruido viario son escasas, con un 7,7% de la España peninsular por debajo de 15 dB(A) de ruido de carreteras.

La superficie afectada por niveles de ruido entre 15 y 55 dB(A) es del 82,85%.

La superficie afectada por más de 55 dB(A), límite considerado como ruidoso para la Red Natura 2000 por la AEMA en el informe nº22/2019 [3], y como perjudicial para el ser humano, es del 9,4%.

Es decir, la mayor parte de la superficie de la España peninsular no se podría considerar exenta de ruido.

4.2. Nivel de ruido en espacios Red Natura 2000

Mediante el cruce del mapa de niveles Lden, y la cartografía de RN2000, se obtienen los siguientes estadísticos:

Tabla 3: Niveles de ruido en la superficie RN2000 de la España peninsular

Estadístico	dB (A)
Máximo	93,32
Mínimo	0,00
Media	28,17
Desviación STD	14,84

En la tabla nº4 se clasifican los datos de la tabla anterior en función de los rangos de ruido considerados, aportando información sobre la proporción de superficie afectada de Red Natura 2000 en cada rango.

Tabla 4: Afección por ruido de carreteras en RN2000 de la España peninsular

Rango	Superficie (miles Ha)	Superficie (%)
0 dB(A)	689,72	5,15%
0-15 dB(A)	1.880,13	14,04%
15-35 dB(A)	6.390,48	47,73%
35-55 dB(A)	3.911,56	29,21%
>55 dB(A)	517,29	3,86%
TOTAL	13.389,18	100%

Normalmente, los valores por debajo de 35 dB(A) de ruido aportado por carreteras quedarán enmascarados para el ser humano, pero pueden suponer un impacto en otras especies [11].

4.3. Superficies susceptibles de ser declaradas RSON

Aplicando el criterio de que las RSON son áreas donde el impacto del ruido antrópico es nulo, la superficie RN2000 susceptible de ser declara RSON es de 689.720 ha, equivalentes al 5,15% de la RN2000.

A esta superficie se podría añadir, como zona de amortiguación, el perímetro de los polígonos resultantes, que están afectados por menos de 15 dB(A) de ruido de carreteras, equivalentes a 1.880.128 ha (14,04 % de la Red). La superficie resultante, en este caso, se eleva a 2.569.848 ha (19,19% de la Red). El resto de la RN2000 (80,81%) no estaría exenta de ruido con potenciales impactos ambientales.

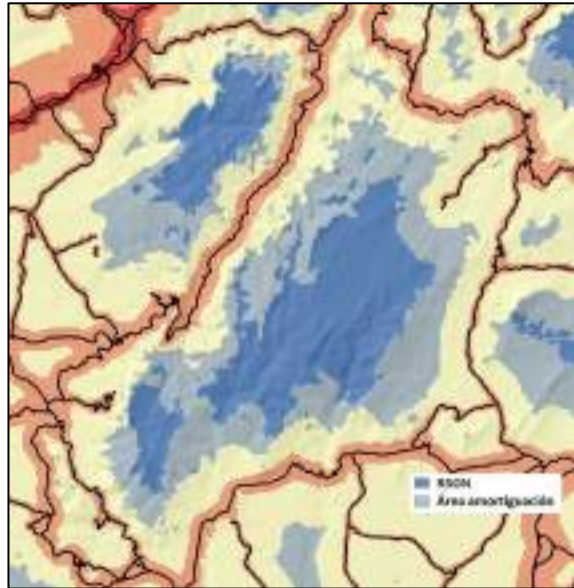


Figura 4: Ejemplo de RSON con área de amortiguación

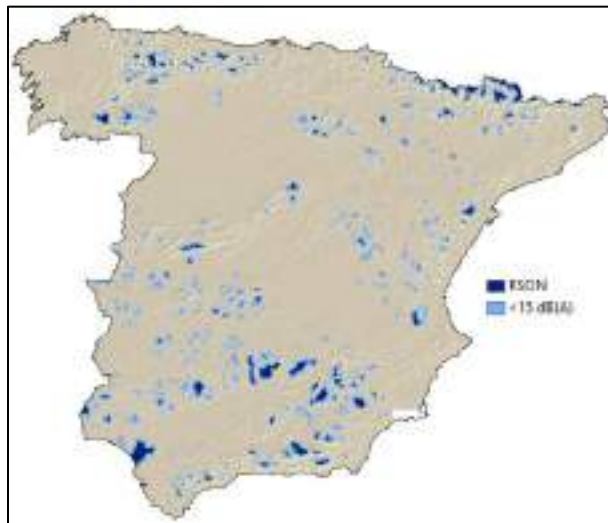


Figura 5: Potenciales zonas RSON en la España peninsular, y áreas con $L_{den} < 15$ dB(A) de ruido de carreteras.

5. DISCUSIÓN

La evaluación de la afección por ruido en grandes superficies es compleja [5]. A las limitaciones del presente trabajo, que se refieren en el epígrafe 7, hay que añadir las limitaciones de acceso a la información, o la determinación de cuál debe ser el alcance del estudio.

En este caso merece la pena referirse a los trabajos “*Good practice guide on quiet areas* [5]” y “*Quietness Suitability Index (QSI) and Natura 2000* [4]” realizados por la Agencia Europea del Medio Ambiente.



Figura 6: QSI de la España peninsular

En estos trabajos se clasifica el territorio europeo en función del índice QSI (Quietness Suitability Index), a partir de análisis de proximidad de fuentes de ruido. Los valores de QSI van desde 100 (calidad excelente), hasta 0 (calidad nula). Los datos geospaciales están disponibles⁶.

Si analizamos estos datos en las superficies declaradas RN2000 en el ámbito de este estudio, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5: Valores de QSI en la Red Natura 2000 de la España peninsular

Rango QSI	Superficie (miles Ha)	Superficie (%)
QSI < 50	4.369,02	32,66%
QSI > 50	9.007,57	67,34%
QSI > 70	4.521,32	33,80%
QSI > 90	273,17	2,04%

Las superficies que el EEA Report No 22/2019 [3] considera que se encuentran afectadas por ruido elevado son

⁶ <https://sdi.eea.europa.eu/data/e9151c34-da65-48b9-a2ca-b9b835480812?path=%2F>

aquellas que presentan $QSI < 50$ (32,66% en el ámbito del presente estudio).

Gran parte del resto de la superficie de la RN2000 (67,34%) coincide con ámbitos que, de acuerdo al mapa de niveles Lden obtenido, y los criterios expuestos en el apartado 3.5, se encontrarían afectadas por niveles de Lden entre 35 y 55 dB(A) que, atendiendo a diversos estudios [11], [12], [28]–[33], son perjudiciales para la biodiversidad, y causan un impacto en los espacios que se declaran para la protección de determinadas especies de fauna.

En cuanto a la declaración de RSON, las áreas con QSI excelente (>90) suponen un 2,04% del territorio RN2000, frente al 5,15% calculado a partir de Lden. Las áreas que podríamos considerar, a partir de QSI, como zonas de amortiguación ($QSI > 70$), suponen una superficie mucho mayor que las consideradas con criterios de modelización (33,80% con QSI, frente al 14,04% con mapa de Lden).

En cuanto al alcance de los trabajos y la complejidad de los datos para la determinación del efecto del ruido en espacios protegidos, el nivel de detalle es importante [31].

Los trabajos tendentes al cálculo del QSI han tenido en cuenta menos ejes viarios que en el presente estudio, si bien se han tenido en cuenta más tipos de fuentes de ruido (aglomeraciones y otros modos de transporte).

No obstante, la menor densidad de la red de carreteras considerada para QSI puede conllevar la infraestimación del efecto del ruido en los espacios protegidos, como se puede observar en la figura nº7. Esto es debido a que las fuentes de ruido viario son las más importantes en volumen y afección en el ámbito de END [3].

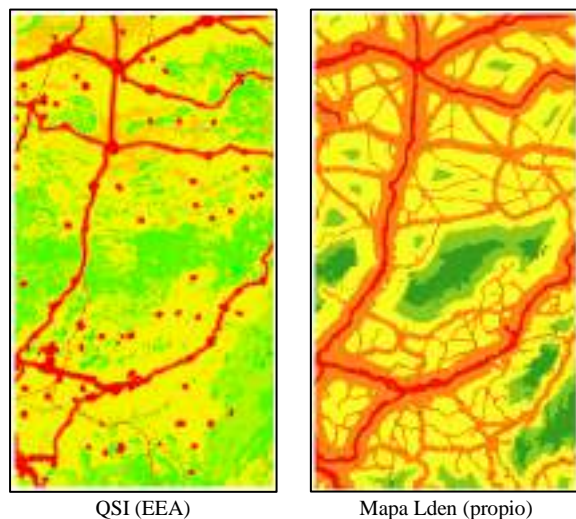


Figura 7: Diferencias debidas a la densidad de la red de carreteras considera en QSI (EEA) y el presente trabajo.

Esta infraestimación podría explicar las diferencias antes indicadas. Por otro lado, tener en cuenta más tipos de fuentes de ruido, en el caso del QSI, también puede explicar que las

áreas de muy alta calidad con este criterio sean de menor tamaño, en particular por la existencia de pequeños asentamientos, considerados como fuentes de ruido en el cálculo de QSI.

No obstante, los resultados obtenidos por ambas metodologías son compatibles. Los propios autores del índice QSI para Europa apuntan la conveniencia de combinar los resultados con mapas de isófonas, para incrementar la precisión de los resultados [34].

6. CONCLUSIONES

Existe un consenso generalizado en la comunidad científica, y en las autoridades ambientales, en relación a los efectos del ruido en la biodiversidad y en los espacios protegidos, y la necesidad de evaluar y gestionar este impacto.

Disponemos de instrumentos adecuados en la legislación española para trabajar en la gestión del ruido ambiental en espacios protegidos, como son las AG y las RSON. Incluso, algunas comunidades autónomas, como es el caso de Cataluña, disponen de instrumentos propios, que ya están aplicando.

Aunque se dispone de dichos instrumentos, es necesario avanzar en su definición y aplicación, bien mediante una mejor y más extensa regulación, bien mediante la elaboración, por parte de las autoridades competentes, de guías técnicas que establezcan criterios homogéneos y adecuados.

El efecto del ruido, en particular el proveniente de las infraestructuras de transporte viario, es relevante en los espacios protegidos de España, y puede afectar a la biodiversidad, siendo un factor a tener en cuenta en la gestión del medio natural, y de las propias infraestructuras.

La evaluación precisa de dichos efectos, así como la delimitación de zonas exentas de impacto (RSON), es compleja, y debe abordarse con diferentes enfoques, metodologías, y a diferentes escalas, desde una evaluación global a gran escala, como la presentada en este trabajo, a estudios de detalle, para la definición precisa de estas zonas.

Un enfoque acústico predictivo, a partir de métodos de cálculo estandarizados y modelos informáticos, puede ser una metodología apropiada para este tipo de estudios y, su combinación con otras metodologías puede arrojar resultados válidos que permitan un mejor conocimiento y apoyen en la gestión medioambiental del ruido en España.

Esta mejor gestión del ruido en espacios protegidos ayudaría a la consecución de los objetivos de los planes y estrategias de biodiversidad europeo y español [35].

7. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La metodología de evaluación de la afeción por ruido en grandes extensiones del territorio, aplicada en el presente trabajo, es una de las posibles [5], y no está exenta de limitaciones.

Concretamente, el mapa obtenido en este estudio presenta una elevada incertidumbre, debido a que:

- No se han tenido en cuenta todas las fuentes de ruido que afectan a los espacios protegidos (ruido aeronáutico, ferroviario, usos tradicionales, ocio en el medio natural...)
- No se han considerado la totalidad de carreteras existentes en España.
- Posibles errores en la asignación automática de tráfico a cada carretera.
- No consideración de obstáculos (edificios, pantallas...)
- No consideración de todos los elementos de las infraestructuras viarias (viaductos, túneles).
- Limitaciones e incertidumbres del método de cálculo.
- Imprecisiones debidas a la escala de trabajo.
- Consideración de índices de ruido ponderados a la audición humana (ponderación A).

Este trabajo debe considerarse una aproximación inicial al problema, que necesita un desarrollo amplio. No obstante, a pesar de las limitaciones indicadas, y en términos macroscópicos, puede arrojar luz sobre la situación actual de la afeción por ruido a los espacios protegidos y la biodiversidad en España, y la necesidad de evaluarla en profundidad, y desarrollar los instrumentos que la legislación española prevé.

8. PRÓXIMOS TRABAJOS

Es necesario avanzar en esta materia, mediante el perfeccionamiento del modelo acústico, con tareas como conseguir una mejor asignación de tráfico, considerar toda la red de carreteras, incluir otros modos de transporte, o reducir el tamaño de cuadrícula de la malla de cálculo.

Sin embargo, es posible que el modelo acústico, por sí mismo, sea insuficiente para llegar a un nivel de detalle adecuado, por lo que la metodología debería completarse con la combinación con otras técnicas, incluida la metodología QSI, consideración de las unidades de paisaje, o la participación de paneles de expertos.

En cualquier caso, no debe perderse de vista que los estudios a gran escala no persiguen una definición en detalle, sino una visión de conjunto, y el alcance debe ajustarse al objetivo buscado.

9. AGRADECIMIENTOS

A Miguel Ángel González García (*Jefe de Área de la Subdirección General de Aire Limpio y Sostenibilidad Industrial, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*), y a Javier Cachón de Mesa (*Director del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX*), por su apoyo e importantes aportaciones técnicas.

10. REFERENCIAS

- [1] R. Guski, D. Schreckenber, and R. Schuemer, "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 14, no. 12, p. 1539, Dec. 2017, doi: 10.3390/ijerph14121539.
- [2] M. Z. Zurilla, "Ruido y medio natural. Especial referencia a los espacios naturales protegidos," *Revista de la Escuela Jacobea de Posgrado* <http://revista.jacobea.edu.mx>, (18), 79-92., 2020, Accessed: Aug. 20, 2022.
- [3] E. Peris, "EEA Report No 22/2019. Environmental noise in Europe: 2020," *Eur. Environ. Agency*, 1, 104., 2020, Accessed: Aug. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>
- [4] European Environmental Agency, "Quietness Suitability Index (QSI) and Natura 2000," 2016. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/quietness-suitability-index-qs-and-1> (accessed Aug. 30, 2023).
- [5] European Environment Agency, "EEA Report No 4/2014. Good practice guide on quiet areas," 2014. Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/good-practice-guide-on-quiet-areas>
- [6] I. García Pérez, ; Karmele Herranz, ; Enrique Rincón, and G. Zugazagoitia, "Aproximación metodológica para la identificación de zonas tranquilas y reservas de sonido de origen natural: ejemplos prácticos," *Tecniacústica 2009, Vol. 12, 2009 (Comunicaciones. Ruido. Sus efectos y control)*, ISBN 84-87095-17-8, 2009.
- [7] C. Merchán Iglesias, "Guía para la caracterización de Reservas de Sonido de Origen Natural," *CONAMA 2016*, 2016, Accessed: Aug. 20, 2022. [Online]. Available: www.conama2016.org
- [8] L. Casado Casado, "Prevención y corrección de la contaminación acústica," *Comentario a la Ley del ruido : Ley 37/2003, de 17 de noviembre, 2004*, ISBN 84-470-2185-8, págs. 207-244, pp. 207-244, 2004.
- [9] Diputación Foral de Bizkaia, "Guía Técnica para la integración de la gestión del ruido en el planeamiento estructural: Zonificación Acústica. Aplicación del Decreto 213/2012 sobre contaminación acústica en la CAPV.," 2014.

- [10] J. M. Grijota Chousa, "Pautas para la gestión de la contaminación acústica sobre fauna y espacios naturales protegidos," *Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura*. 2014. Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/14613>
- [11] I. Soto Molina, F. Robledano Aymerich, P. Rivera Gallego, and R. Arce Ruiz, "Conveniencia de desarrollo normativo y metodológico de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en cuanto a las áreas acústicas tipo g 'espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica,'" Elche (España): Congreso Tecni-Acústica 2022, 2022.
- [12] C. D. Francis and J. R. Barber, "A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority," *Front Ecol Environ*, vol. 11, no. 6, pp. 305–313, Aug. 2013, doi: 10.1890/120183.
- [13] C. D. Francis, C. P. Ortega, and A. Cruz, "Noise Pollution Changes Avian Communities and Species Interactions," *Current Biology*, vol. 19, no. 16, pp. 1415–1419, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.cub.2009.06.052.
- [14] A. Martínez-Abraín, D. Oro, J. Jiménez, G. Stewart, and A. Pullin, "A systematic review of the effects of recreational activities on nesting birds of prey," *Basic Appl Ecol*, vol. 11, no. 4, pp. 312–319, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.baae.2009.12.011.
- [15] L. Runko Luttenberger, M. Slišković, I. Ančić, and H. Ukić Boljat, "Environmental Impact of Underwater Noise," *Pomorski zbornik*, (4), pp. 45–54, 2022.
- [16] E. Bocher, G. Guillaume, J. Picaut, G. Petit, and N. Fortin, "NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps," *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 8, no. 3, p. 130, Mar. 2019, doi: 10.3390/ijgi8030130.
- [17] UMRAE - Lab-STICC, "Noise Modelling software Scientific production," 2022. https://noisemodelling.readthedocs.io/en/latest/Scientific_production.html (accessed Aug. 24, 2023).
- [18] Direction Départementale des Territoires du Rhône, "Cartes de bruit stratégiques des infrastructures routières É. 4," 2023. <https://carto2.geo-ide.din.developpement-durable.gouv.fr/frontoffice/?map=c022b498-59db-4369-90d9-efbb222b8e50> (accessed Aug. 29, 2023).
- [19] P. Aumond *et al.*, "Strategic noise mapping in France to 2023: Coupling a national database with the open-source software NoiseModelling," Aug. 2022.
- [20] MITMA. Dirección General de Carreteras, "Mapas de tráfico de la Red de Carreteras del Estado," 2019. <https://mapas.fomento.gob.es/mapatrafico/2019/> (accessed Aug. 29, 2023).
- [21] MITMA. Instituto Cartográfico Nacional, "Centro Nacional de Descargas," *Base Cartográfica Nacional*.
- [22] European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN), "Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure," 2006.
- [23] K. Stylianos, P. Marco, and A.-L. Fabienne, "Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)," European Commission, 2012. doi: <https://doi.org/10.2788/32029>.
- [24] A. Kok and A. van Beek, "Amendments for CNOSSOS-EU: Description of issues and proposed solutions," Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, 2019. doi: 10.21945/RIVM-2019-0023.
- [25] ISO 9613-2, "Acústica-Atenuación del sonido cuando se propaga en el ambiente exterior, Parte 2: Método general de cálculo," *Serie de normas ISO de la Organización de Estandarización Internacional*. 1996.
- [26] K. Larsson, "Updated Road Traffic Noise Emission Models in Sweden," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise16, Hamburg GERMANY, pages 6841-7829, pp. 7180-7191(12)*, Institute of Noise Control Engineering.
- [27] MITECO, "Infraestructura de Datos Espaciales del MITECO." <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide.html> (accessed Aug. 30, 2023).
- [28] R. D. Alquezar and R. H. Macedo, "Airport noise and wildlife conservation: What are we missing?," *Perspect Ecol Conserv*, vol. 17, no. 4, pp. 163–171, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.pecon.2019.08.003.
- [29] C. Iglesias-Merchán, L. Diaz-Balteiro, and J. de la Puente, "Road traffic noise impact assessment in a breeding colony of cinereous vultures (*Aegypius monachus*) in Spain," *J Acoust Soc Am*, vol. 139, no. 3, pp. 1124–1131, Mar. 2016, doi: 10.1121/1.4943553.
- [30] J. Newport, D. J. Shorthouse, and A. D. Manning, "The effects of light and noise from urban development on biodiversity: Implications for protected areas in Australia," *Ecological Management & Restoration*, vol. 15, no. 3, pp. 204–214, Sep. 2014, doi: 10.1111/emr.12120.
- [31] C. Iglesias Merchan, "Evaluación del ruido ambiental en espacios naturales protegidos: implicaciones para su gestión," Universidad Politécnica de Madrid, 2014. doi: 10.20868/UPM.thesis.30869.
- [32] M. Wright, P. Goodman, and T. Cameron, "Exploring behavioural responses of shorebirds to impulsive noise," *Wildfowl 60: 150-167.*, Dec. 2010.
- [33] S. Marasinghe, P. Perera, D. Newsome, S. Kotagama, and C. Jayasinghe, "Understanding the impact of recreational disturbance caused by motor vehicles on waterbirds: a case study from the Bundala Wetland, Sri Lanka," *J Coast Conserv*, vol. 26, no. 2, p. 6, Apr. 2022, doi: 10.1007/s11852-022-00853-8.
- [34] N. Blanes, F. Domingues, J. Fons, M. J. Ramos, and M. S. de la Maza, "Zonas tranquilas en Europa. Propuesta de índice y resultados," *Jornada "Aplicación de la Directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental". CEDEX*. 2021.
- [35] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Plan estratégico estatal del patrimonio natural y de la biodiversidad a 2030*. 2022.

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE BARRERA MULTIFUNCIONAL PARA ENTORNOS URBANOS

José Ignacio Riesco García^{1*}, Ángel Arenaz Gombau¹, Ana Esther Espinel Valdivieso¹, Diego González Jiménez¹, Francisco Verdugo González², José Feroso Domínguez²

¹Audiotec, Valladolid, España,

²Cartif, Valladolid, España

RESUMEN

El proyecto “Noise and Emissions MOnitoring and radical mitigation” (NEMO), financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, tiene por objeto desarrollar nuevas tecnologías para medir y mitigar los impactos ambientales debidos al tráfico rodado, marítimo y ferroviario. En el marco de este proyecto, Audiotec y Cartif han desarrollado una barrera multifuncional que, por un lado, reduce la contaminación atmosférica mediante un sistema de captación activa y el empleo de un biofiltro con capacidad para eliminar del ambiente urbano PM, NO y NO₂ y, por otro, actúa como pantalla acústica multifuncional recubierta con un material fotocatalítico.

Tras un proceso de investigación se ha desarrollado una solución que desde el punto de vista acústico actúa apantallando el ruido procedente del emisor y acondicionando el espacio tras la pantalla para hacerlo más confortable. Finalmente se ha fabricado un prototipo de pantalla multifuncional, el cual ha sido instalado en un ambiente real para su monitorización.

En este trabajo se presentan los resultados del desarrollo de la solución, así como sus aplicaciones en entornos urbanos.

ABSTRACT

The “Noise and Emissions MOnitoring and radical mitigation” (NEMO) project, funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, aims to develop new technologies to measure and mitigate the environmental impacts due to road, maritime and railway. Within the framework of this project, Audiotec and Cartif have developed a multifunctional barrier that, on the one hand, reduces atmospheric pollution through an active capture system and the use of a biofilter with the capacity to eliminate PM, NO and NO₂ from the urban environment and

on the other hand, acts as a multifunctional acoustic barrier covered with a photocatalytic material.

After a research process, a solution has been developed that from an acoustic point of view acts by shielding the noise coming from the emitter and conditioning the space behind the barrier to make it more comfortable. Finally, a prototype of a multifunctional barrier has been manufactured, which has been installed in a real environment for monitoring.

This work presents the results of the development of the solution, as well as its applications in urban environments.

Palabras Clave— Pantalla acústica, multifuncional, prototipo, urbano.

1. INTRODUCCIÓN

Audiotec y Cartif forman parte del consorcio que está llevando a cabo el proyecto “Noise and Emissions MOnitoring and radical mitigation” (NEMO), financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, cuyo objetivo general es el desarrollo de nuevas tecnologías para medir y mitigar los impactos ambientales debidos al tráfico rodado, marítimo y ferroviario.

En el alcance de este proyecto se contempla la contaminación acústica, que es un problema importante de salud ambiental en Europa, y cuyos efectos adversos afectan a la calidad de vida, al deterioro de la salud y a la disminución de la capacidad de concentración de las personas.

Por otro lado, la contaminación del aire también perjudica la salud humana y el medio ambiente. Las exposiciones a largo plazo a estos contaminantes producen daños en el sistema respiratorio que pueden provocar la muerte prematura. Alrededor del 90 % de los habitantes de las ciudades en Europa están expuestos a contaminantes en concentraciones superiores a los niveles de calidad del aire considerados perjudiciales para la salud.

La participación de Audiotec y Cartif en este proyecto se ha centrado en el diseño de una barrera multifuncional para

* **Autor de contacto:** ignacio.riesco@audiotec.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

mitigar el ruido y mejorar la calidad del aire en el entorno y en la realización de un demostrativo para comprobar su efectividad.

En las ciudades se suelen instalar pantallas acústicas para proteger los edificios del ruido generado por las grandes infraestructuras viarias que las atraviesan. Por lo general, las pantallas tienen alturas superiores a 2,5 metros y su aplicación se limita a aquellas zonas donde las restricciones que produce la pantalla (impacto visual, circulación de peatones, accesos, cruces con otras vías, etc.) son compatibles. Debido a estas limitaciones, en el entorno de la red viaria colectora y de acceso de las ciudades el empleo de pantallas acústicas convencionales no es una solución viable. Además, con motivo de la proliferación de terrazas de ocio y, en general, de la ocupación de la vía pública por parte de las personas, se hace necesario proteger los entornos urbanos del ruido ambiental con soluciones de menor impacto visual, más adaptables y que estén en armonía con la ciudad.

2. OBJETIVOS

La barrera multifuncional desarrollada integra una pantalla acústica, un revestimiento fotocatalítico para capturar NOX y un biofiltro de jardín como solución activa para filtrar los principales contaminantes del aire.

Como valores de referencia para orientar el objetivo de rendimiento del sistema se ha considerado:

- Reducción de ruido urbano: >3 dB
- Reducción fotocatalítica de NOX: ~20%
- Captación de caudal de aire: >100m³/min·m²
- Captura de NOX: > 90%
- Captura de MP: >75%

Las principales condiciones consideradas en el diseño de la solución son las siguientes:

- La barrera debe cumplir con los objetivos de rendimiento citados anteriormente;
- La solución debe incluir una solución activa contra la contaminación del aire mediante la absorción del aire;
- Se limitará la altura máxima de la barrera, no siendo admisibles alturas superiores a 2 metros, que no son aptas para entornos urbanos, y
- La barrera se diseñará bajo criterios de integración paisajística con su entorno,

3. CONSIDERACIONES GENERALES DE LA BARRERA MULTIFUNCIONAL

A partir de los objetivos que se han prescrito se han llevado a cabo tres actividades paralelas de investigación y desarrollo y una actividad final de integración para diseñar y crear un primer prototipo de barrera multifuncional.

Los trabajos de reducción de ruido se han centrado en el diseño geométrico de la pantalla acústica, la selección de los materiales y el diseño de perforaciones superficiales para la mejora de la absorción del sonido. Se han estudiado

diferentes configuraciones enfocadas principalmente a la integración de la barrera multifuncional en entornos urbanos y teniendo en cuenta la compatibilización de su uso con terrazas de ocio. Se han estudiado diferentes materiales como la madera y materiales derivados en combinación con lana mineral como material absorbente.

El recubrimiento fotocatalítico ha sido diseñado especialmente para materiales de madera. La formulación incluye el fotocatalizador, aglutinantes orgánicos e inorgánicos y algunos otros aditivos, pero evitando otras cargas para crear una solución transparente. De esta forma no se modifican las propiedades estéticas de los materiales de madera. El rendimiento fotocatalítico del recubrimiento fotocatalítico es de alrededor del 20 % (según ISO 22197-1) y se aplicará en todas las superficies de la barrera.

El sistema de biofiltro consta de dos componentes principales: i) un extractor para absorber el aire contaminado y una zona plenum donde se libera el aire contaminado; y ii) un biofiltro multicapa con una capa fibrosa para capturar principalmente PM, una base adsorbente sobre carbón activo como amortiguador de la concentración de NO, una capa de sustrato natural para capturar el NO₂ y finalmente vegetación para metabolizar y estructurar el suelo.

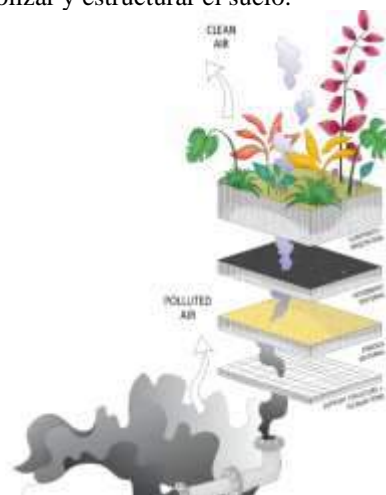


Figura 1. Esquema del sistema de biofiltro.

De esta forma, se puede decir que el biofiltro es una solución activa y completa para eliminar la contaminación del aire. Se estudiaron diferentes materiales para cada capa con el fin de conseguir el rendimiento objetivo pero teniendo en cuenta la caída de presión como parámetro clave.

El sistema ha sido diseñado para crear una solución activa para la reducción de la contaminación del aire. El extractor se selecciona considerando la caída de presión a través de los sistemas y la superficie disponible.

Durante la actividad de integración final, los estudios se centraron en la combinación de los tres sistemas en la barrera multifuncional y se construyó un primer prototipo.

Por otro lado, en los trabajos de diseño se consideraron varios escenarios para diferentes ubicaciones en la ciudad. La

alternativa seleccionada para demostración piloto fue la integración de la solución en entornos de terrazas de ocio.

4. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN ACÚSTICA

En una primera fase se han valorado diferentes alternativas de protección de la pantalla acústica en función de distintas posibilidades de ubicación y de los emisores acústicos presentes. Finalmente, una vez tomada la decisión de las características del medio en donde se implanta la barrera, se han considerado dos modos de protección:

- Protección del ruido ambiental generado por los automóviles en el espacio destinado a las personas (desarrollo de soluciones para la mitigación del ruido ambiental proveniente de la carretera tras la pantalla acústica), y
- Protección del ruido ambiental generado por las personas que se encuentran en el recinto a proteger (desarrollo de soluciones para el acondicionamiento acústico del espacio público ocupado por las personas con el objetivo de mejorar el confort acústico).

Paralelamente se han analizado los condicionantes del diseño de la barrera para que permita alojar el biofiltro desarrollado por Cartif y que cumpla con la normativa de seguridad y otras normas aplicables.

Durante el proceso de diseño de la geometría de la pantalla se han valorado distintas opciones.

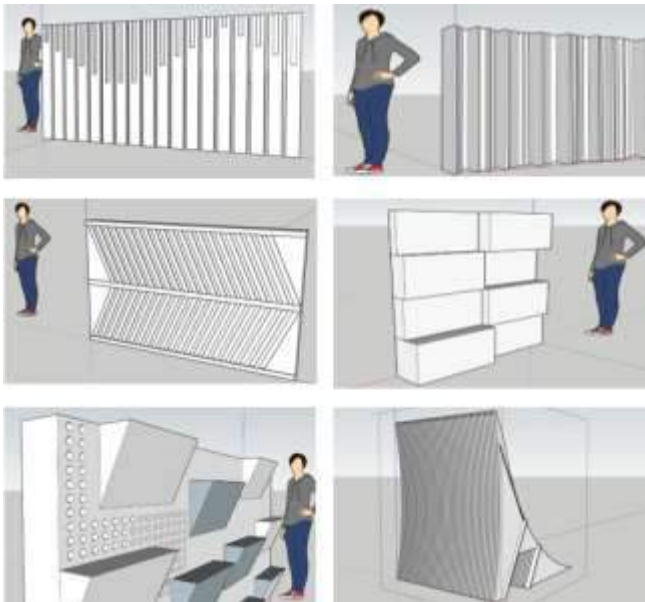


Figura 2. Alternativas de diseño de la pantalla acústica.

Finalmente se ha optado por una geometría donde la cara de la pantalla próxima a la carretera conste de paneles y listones de sección rectangular y la cara interior esté compuesta de paneles perforados.

4.1. Ensayos de laboratorio y resultados

En una primera fase se ha realizado un estudio para decidir el material base y el tipo de sistema a utilizar en la barrera (soluciones en la superficie de la barrera frente a la acera para el acondicionamiento acústico). Inicialmente se ha optado por dos alternativas:

- Sistema basado en la combinación de lana mineral y paneles metálicos perforados, y
- Sistema basado en la combinación de lana mineral y paneles de madera perforados.

Se realiza una primera tanda de ensayos según la norma UNE EN ISO 354:2004, Acústica. Medición de la absorción acústica en cámara reverberante con la alternativa basada en el sistema de paneles metálicos perforados con lana mineral. Se analizan dos variables: el efecto de una cámara de aire de diferentes espesores entre la lana mineral y el panel, y el efecto de la geometría de las perforaciones.

Algunos de los resultados obtenidos se muestran a continuación:



Figura 3. Muestra para ensayo de absorción acústica.

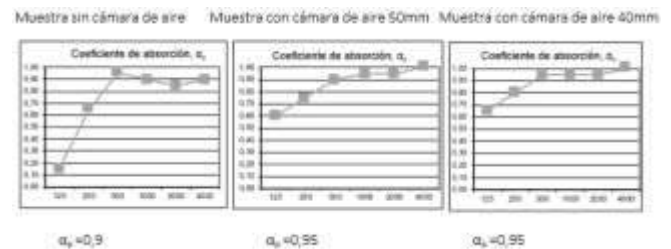


Figura 4. Tests para analizar el efecto de la cámara de aire.

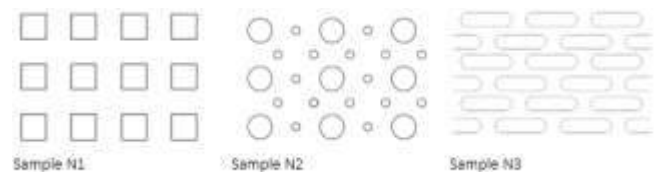


Figura 5. Configuraciones de paneles perforados estudiados.

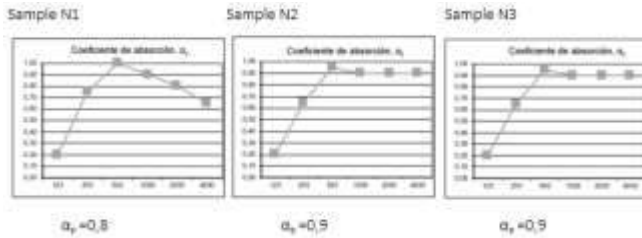


Figura 6. Tests para analizar el efecto de la geometría de las perforaciones.

Posteriormente se han replicado los ensayos anteriores sustituyendo los paneles metálicos por paneles de madera perforados.

El panel seleccionado está fabricado en madera MDF hidrófuga de 6 mm de espesor.

Los resultados obtenidos para configuraciones equivalentes han sido muy similares. Finalmente, se ha optado por utilizar madera como material base de la barrera frente a soluciones alternativas basadas en materiales metálicos debido a su mejor comportamiento medioambiental y su mayor integración en entornos urbanos.

Además de los estudios anteriores, se ha evaluado la absorción acústica de diferentes configuraciones de lana mineral y fibra de madera.

Los resultados obtenidos para espesores y densidades similares son ligeramente mejores para la lana mineral que para la lana de fibra de madera.

En la siguiente etapa se han definido varios diseños geométricos de perforaciones.

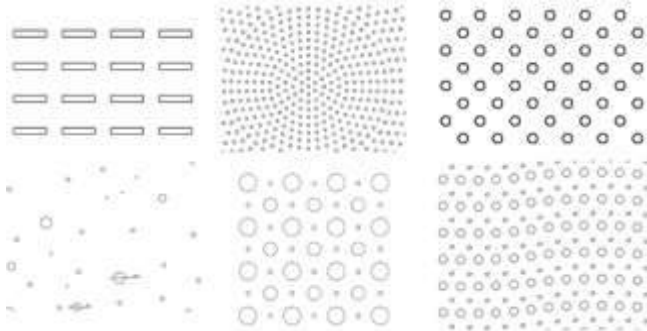


Figura 7. Diseños de geometría de perforación estudiados

Se han realizado diversos estudios analíticos para tomar una decisión sobre el tipo de perforación a considerar. Se ha optado por dos tipos de diseño: paneles de madera MDF con perforaciones de 8 mm de diámetro y diferentes porcentajes de agujeros y paneles de madera MDF con perforaciones aleatorias con diámetros entre 4 y 22 mm.

El mecanizado de los paneles se ha realizado con medios propios con ayuda de una máquina CNC, de modo que se han mecanizado diversas alternativas de panel perforado que posteriormente se han ensayado en combinación con lana mineral. Los resultados de los ensayos realizados han

demostrado que para ambos diseños, cuando los porcentajes de huecos son inferiores al 20%, la absorción del sistema no es la adecuada, mientras que a partir del 25% de huecos los valores de absorción alcanzados son $\alpha_w > 0,9$, valor suficiente para conseguir un buen confort acústico.

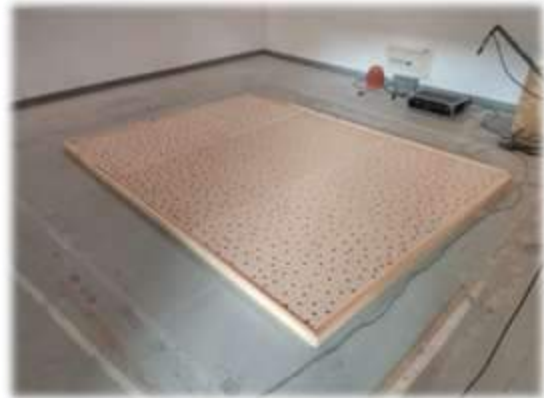


Figura 8. Muestra de laboratorio de panel perforado

En una siguiente etapa se ha realizado un estudio para decidir el tipo de sistema a utilizar en la barrera (soluciones para la mitigación del ruido en la superficie de la barrera frente a la vía).

Se ha optado por un sistema que combina lana mineral con lamas de madera. Al igual que en el caso de la solución estudiada para la superficie orientada a peatones, en primer lugar se tuvo en cuenta la absorción acústica de diferentes alternativas de diseño basadas en dos tamaños de lamas (sección 30x20 mm y sección 70x20 mm) donde la separación entre las lamas variaba.



Figura 9. Muestra de lana mineral con listones de madera

Los valores obtenidos en los ensayos de absorción realizados oscilan entre $0,9 > \alpha_w > 0,85$ para espaciados normales entre lamas.

En la siguiente fase se han realizado ensayos de aislamiento de ruido aéreo para diferentes configuraciones de los sistemas de paneles perforados-lanas minerales-lamas.

Las salas donde se han realizado los ensayos cumplen con la normativa y requisitos establecidos en la Norma UNE EN ISO 10140-5:2011.

En resumen, finalmente se ha optado por una barrera de altura variable, que permite la visibilidad y tiene poco impacto paisajístico.

El material principal de la barrera es la madera. La cara de la pantalla próxima a la carretera consta de paneles y listones de madera, sobre los que se aplica una pintura fotocatalítica, mientras que la cara interior se compone de paneles de madera perforados. En el interior se emplea lana mineral y el diseño incluye espacios para alojar el biofiltro.

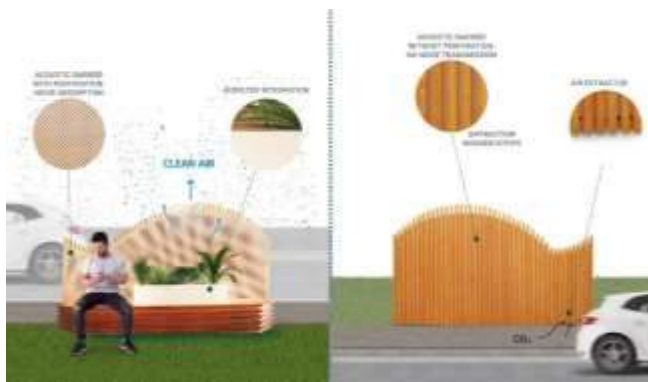


Figura 10. Esquema de operación del módulo de barrera.

5. FABRICACIÓN E MONTAJE DEL PROTOTIPO

Una vez definido el diseño de la solución, el siguiente paso ha sido decidir el lugar de implantación del prototipo.

La barrera multifuncional se ha ubicado en la calle Padre José Acosta, Valladolid. Esta ubicación fue elegida por su alta actividad vehicular y altas emisiones.



Figura 11. Localización del lugar de implantación del prototipo.

El proceso de montaje de los distintos módulos de barrera se realizó de forma satisfactoria en marzo de 2023.



Figura 12. Barrera multifuncional instalada.

5. MONITORIZACIÓN Y RESULTADOS

Tras la instalación del prototipo de barrera multifuncional se realizaron mediciones de ruido ambiental para caracterizar el ruido de la zona y evaluar la eficacia de la solución propuesta.

En la zona donde se levantó la barrera, el principal emisor acústico es el tráfico rodado. Además, existe presencia peatonal en la zona, aunque su impacto acústico es insignificante respecto al ruido del tráfico. No existen actividades industriales o comerciales en las proximidades que puedan influir en el ruido ambiental, ni existen otros emisores acústicos significativos.

Inicialmente, tras la instalación de la barrera, se ha llevado a cabo una primera ronda de mediciones de ruido ambiental. En el momento de la campaña, la carretera cercana estaba cerrada al tráfico debido a obras. Por lo tanto, se ideó un ensayo generando ruido con un altavoz colocado en la carretera en diferentes lugares. Las mediciones se realizaron a distintas distancias de la fuente y a diferentes alturas, tanto delante como detrás de la barrera, así como en zonas sin protección.

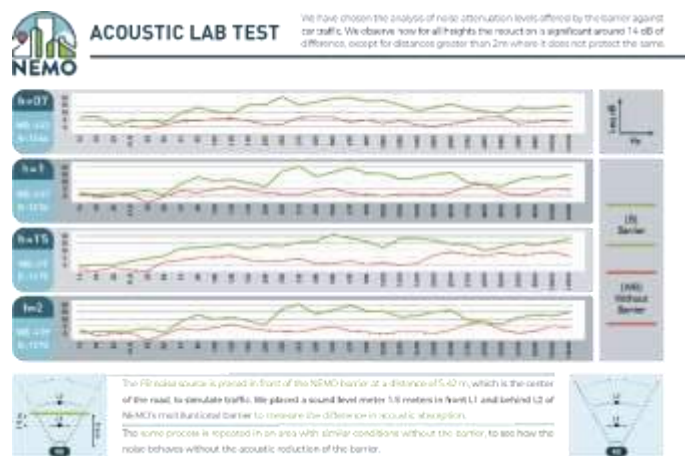


Figura 13. Resumen de resultados

Las mediciones in situ realizadas han dado como resultado reducciones en los niveles de ruido ambiental de 6dB(A), por encima del valor objetivo de 3 dB(A).

Recientemente se ha abierto al tráfico de la carretera próxima a la barrera y está previsto la monitorización del ruido ambiental en condiciones de funcionamiento, con tráfico rodado, si bien actualmente no se ha comenzado con esta monitorización.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se han obtenido con el desarrollo del proyecto han sido las siguientes:

- Se ha desarrollado una novedosa barrera multifuncional para entornos urbanos con especificaciones acústicas adecuadas y que permite un recubrimiento fotocatalítico y albergar un sistema de biofiltro capaz de capturar eficientemente los principales contaminantes del aire.
- La solución acústica combina paneles de madera perforada, lana mineral y lamas de madera para conseguir una solución que proporciona una reducción del ruido ambiental de al menos 3 dBA y un buen comportamiento en relación a la absorción acústica en la superficie opuesta a la vía,
- La barrera multifuncional se diseña bajo criterios de integración paisajística con su entorno, es comercializable y su aplicación se ha enfocado para zonas donde se concentran terrazas de ocio o se acumulan personas.

7. REFERENCIAS

[1] Hänninen, O., et al., 2014, 'Environmental Burden of Disease in Europe: Assessing Nine Risk Factors in Six Countries', *Environmental Health Perspectives* 122(5), pp. 439-446 (DOI: 10.1289/ehp.1206154).

[2] WHO, 2018, WHO environmental noise guidelines for the European region, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen accessed 7 December 2018.

[3] M Garai, 'Recent advances in noise barriers testing, qualifying and standardization'(2010).

ESTUDIOS ACÚSTICOS PARA LA AUTORIZACIÓN DE PROYECTOS DE AERÓDROMOS Y HELIPUERTOS. CRITERIOS DE ELABORACIÓN Y CALIDAD

*Eva Santos González**
Antonio Donoso López
Nagore Lasa García
Mirela Vladovic Zupcevic

Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y la Seguridad Aeronáutica S.M.E. M.P.S.A, SENASA.
Avda. de la Hispanidad, 12. 28042 Madrid.

RESUMEN

Los proyectos de aeródromos y helipuertos de uso restringido deben someterse a un procedimiento de evaluación ambiental, según la Ley 21/2013, de evaluación ambiental, de 9 de diciembre [2]. Uno de los aspectos ambientales que se debe evaluar es el ruido generado por las operaciones aéreas, de acuerdo con la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido[3]. Para ello, en determinadas condiciones de ubicación y operación de la instalación, es necesario elaborar un estudio acústico que demuestre el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica establecidos en la normativa vigente, o los límites de inmisión en caso de tratarse de una infraestructura nueva.

Los autores de esta comunicación cuentan con la experiencia de haber apoyado a las autoridades competentes tanto en la revisión de los estudios acústicos presentados por los promotores, como en la definición de los criterios técnicos para facilitar su elaboración por parte de las consultoras acústicas. En este artículo se exponen los principales aspectos que se deben tener en cuenta para realizar un estudio acústico adecuado y de calidad para la autorización de proyectos de aeródromos y helipuertos.

ABSTRACT

According to Law 21/2013, of December 9th [2], on environmental assessment, projects involving restricted-use aerodromes and heliports must undergo a comprehensive environmental assessment procedure. This law ensures the proper evaluation and consideration of environmental effects of these projects. One crucial environmental aspect that must be assessed is the noise generated by air operations, as required by Law 37/2003, of November 17th, related to noise [3]. In order to comply with the prevailing regulations and acoustic quality objectives or, in the case of a new

infrastructure, immission limits, it is essential to conduct an acoustic study under specific conditions of location and operation of the facility.

The authors of this paper have extensive experience in providing support to competent authorities in two key areas. First, they have assisted in reviewing acoustic studies submitted by project developers. Secondly, they have played a crucial role in defining technical criteria to make it easier for acoustic consultants to carry out these studies. This article aims to outline the essential aspects that should be considered in order to conduct a comprehensive and high-quality acoustic study for the authorization of aerodrome and heliport projects.

Palabras Clave — Acústica ambiental, aeronaves, evaluación de impacto ambiental, ruido, normativa, aeródromos, helipuertos.

1. INTRODUCCIÓN

Todas las infraestructuras destinadas al aterrizaje y despegue de aeronaves, dentro de la amplia definición que facilita la normativa española en la Ley de Navegación Aérea [1], se consideran aeródromos. Los aeródromos de uso restringido son aquellos en los que no se realizan operaciones comerciales de pasajeros, mercancías o correo, distinguiéndose por tanto de los aeródromos de uso público. De esta manera los aeródromos, privados o especializados, los helipuertos, los hidroaeródromos y cualquier instalación que permita la operación de aeronaves, desde aeronaves ultraligeras hasta jets, con fines de aviación deportiva, escuelas de vuelo, servicios de emergencias (sanitarios, anti-incendios, protección civil, etc.), operaciones especiales o de cualquier otro tipo de aviación general, siempre que no sean consideradas transporte aéreo comercial, se encontrarán en la categoría de uso restringido.

* **Contacto:** esantos@senasa.es

Copyright: ©2023 Eva Santos et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

La autorización de estas instalaciones corresponde al Estado, concretamente a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, AESA, en aquellas comunidades autónomas que no ejercen competencias en materia de infraestructuras aeronáuticas. En fecha de esta comunicación, esas comunidades, en las que AESA autoriza aeródromos de uso restringido, son todas a excepción de la Comunidad de Madrid, Cataluña, Comunidad Valenciana, Aragón y Navarra, que autorizan sus propias infraestructuras aeronáuticas siempre que no sean de Interés General del Estado. En promedio AESA autoriza al año, entre proyectos nuevos y modificaciones de infraestructuras ya existentes, alrededor de 5 proyectos de aeródromos y 8 proyectos de helipuertos.

El proceso de autorización de proyectos de aeródromos y helipuertos de uso restringido consta de 4 fases, donde la tramitación ambiental constituye la fase 2.

En aplicación de la Ley de Evaluación Ambiental [2], la autorización de los proyectos de aeródromos será objeto de una evaluación de impacto ambiental simplificada, al encontrarse entre los proyectos recogidos en el Anexo II de la citada ley (Grupo 7. Proyectos de Infraestructuras), que en ocasiones se iniciará como evaluación ordinaria, por ejemplo, si el proyecto se encuentra en espacios protegidos.

Tanto si el trámite es del tipo simplificado, en el que se presentará el documento ambiental, como si es de tipo ordinario, en cuyo caso elabora un estudio de impacto ambiental (EsIA), la valoración de impactos por ruido se ha de incluir en dicho trámite, como parte o anexo de esa documentación.

Dentro del procedimiento de evaluación ambiental el órgano sustantivo, AESA, intercede en los trámites ambientales entre el promotor del proyecto (gestor del aeródromo) y el órgano ambiental (ministerio con competencias en medio ambiente), siendo este último el que evalúa y decide sobre las afecciones en el medio ambiente.

El vínculo entre la normativa de ruido ambiental y el procedimiento de evaluación ambiental se establece a través del artículo 18 de la Ley de Ruido [3]. De esta manera, la evaluación ambiental es el instrumento preventivo mediante el cual, en el procedimiento autorización de un proyecto, se ha de predecir el cumplimiento de objetivos de calidad acústica, o valores límite, en su caso, de la operación de la infraestructura, así como, si es necesario, proponer la manera de corregirla.



La falta de un estudio acústico, cuando es preceptivo, o su mala calidad puede llevar al órgano ambiental a rechazar todo el documento ambiental o el estudio de impacto ambiental, dilatando el procedimiento de autorización y poniendo en aprietos la viabilidad del proyecto. Es por esto que AESA, como responsable de la autorización, revisa y requiere subsanaciones, si es preciso, antes de su remisión al órgano ambiental.

Una vez ejecutado el proyecto, las desviaciones posibles respecto a las previsiones del estudio acústico se contemplan

y se admiten hasta un cierto grado, pero, cuando estas son grandes y, principalmente, si se evidencian incumplimientos no previstos, se puede poner en compromiso toda la autorización de la instalación.

2. NECESIDAD DE ESTUDIO ACÚSTICO DE LA INFRAESTRUCTURA

Como continuación de lo expuesto anteriormente, se ha de indicar que ciertos proyectos no requieren de una evaluación de su impacto acústico. Esto puede ocurrir en dos casos:

1. Aquellos proyectos que estén exentos de una evaluación de impacto ambiental (EIA) y, por tanto, no tienen evaluación del ruido. Estos casos se recogen en la Guía de Tramitación Ambiental de Proyectos de Aeródromos Y Helipuertos [4], que la Autoridad AESA, publica en su sitio web. Destacan entre ellos, las modificaciones estructurales y/o funcionales de proyectos ya existentes sin efectos significativos para el medio ambiente, o los proyectos de uso exclusivo sanitario, de emergencias, o prevención y extinción de incendios, que se ubican fuera de espacios protegidos. La documentación a presentar para justificar dicha exención de la evaluación ambiental se recoge en dicha guía [4]. Se debe obtener la aceptación de la solicitud de exención.
2. Aquellos proyectos que tengan procedimiento de evaluación ambiental simplificada pero que, de acuerdo a los criterios establecidos y publicados por AESA en [4], no presenten una potencial afección acústica en zonas residenciales o de especial protección (zonas de acuerdo a la definición que se establece en el Real Decreto 1367/2007 [5]), debido a su ubicación muy alejada de estas zonas. Estos proyectos que, en la elaboración del documento ambiental, pueden quedar exentos de un estudio acústico, deben cumplir las siguientes directrices:
 - Tener menos de 7000 operaciones anuales (contando cada operación como  o  en el aeródromo), y
 - Tener menos de 70 operaciones diarias en los días de máxima actividad, y
 - Ninguna zona de especial protección se encuentre íntegramente o parcialmente comprendida dentro del contorno E1 (ver Figura 1, Figura 2. y Figura 3), y
 - Ninguna zona residencial queda completamente o parcialmente comprendida dentro del perímetro E2 (ver Figura 1, Figura 2. y Figura 3).

O, alternativamente a esos puntos, estarán exentos si el proyecto es una modificación de un proyecto preexistente exclusivamente de uso sanitario, de emergencias o contra incendios.

Es importante destacar que en ningún escenario estarán exentos de presentar un estudio de simulación acústica aquellos aeródromos en los que tengan previsto operar aeronaves propulsadas por motores a reacción, conocidas como tipo JET.

En cualquier caso, el documento ambiental deberá presentar, en su apartado correspondiente de valoración de impacto acústico, la justificación de que el proyecto cumple las condiciones anteriores y, por tanto, no es necesario un estudio de valoración del ruido generado por la infraestructura.

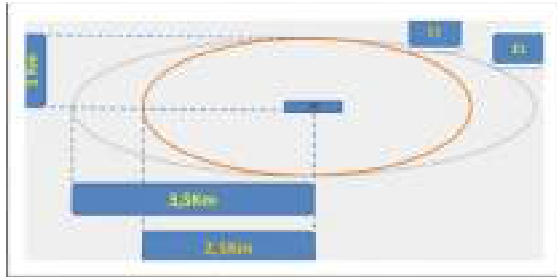


Figura 1. Áreas de influencia para ruido. Nuevas instalaciones de aeródromos. Fuente [4]

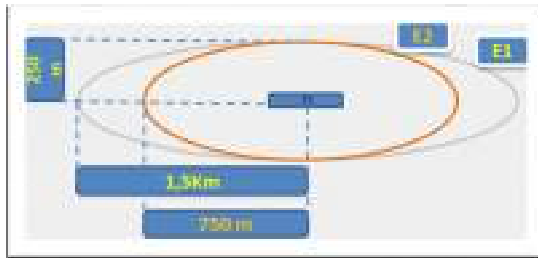


Figura 2. Áreas de influencia para ruido. Modificación de instalaciones de aeródromos. Fuente [4]

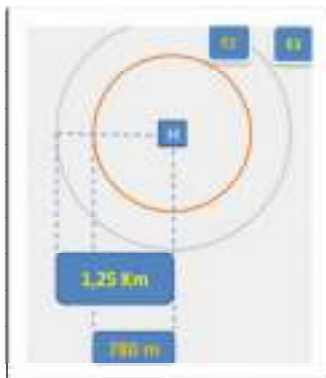


Figura 3. Área de influencia de ruido. Helipuertos. Fuente [4]

En todos los demás casos, se procederá de acuerdo a lo indicado en los puntos 4 a 7. La documentación ambiental del trámite de evaluación ambiental del proyecto, deberá

incluir un estudio acústico que incluya una evaluación del impacto acústico inicial y máximo previsto.

3. OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS ACÚSTICOS

Es fundamental tener en consideración el propósito del estudio acústico: anticipar el posible impacto acústico del proyecto en zonas sensibles (residenciales, educativas, sanitarias), con el fin de proporcionar al órgano ambiental los elementos necesarios para tomar decisiones sobre la viabilidad del proyecto, las posibles medidas correctoras o la necesidad de buscar alternativas.

La evaluación debe centrarse en la afección del ruido a las personas, ya que solamente en esas áreas acústicas es donde se han establecido los valores normativos de objetivos de calidad acústica y valores límite permitidos. Solo en los casos en los que exista una zona de reserva de sonidos de origen natural declarada por una comunidad autónoma, de acuerdo con la Ley del Ruido [4], se evaluará el impacto en espacios naturales y siempre siguiendo lo establecido en dicha declaración según la normativa.

La autoridad aeronáutica considera que los aeródromos son infraestructuras aeroportuarias a efectos del Real Decreto 1367/2007 [5] y considera ruido de la infraestructura aquel asociado a la emisión de las aeronaves en sus despegues y sus aterrizajes. No se incluyen las operaciones que las aeronaves puedan hacer en posiciones alejadas de estas, en cuyo caso, ya en la fase de operación, se plantea siempre primero la vulneración de posibles alturas mínimas de la normativa aeronáutica sobre población.

A través de un estudio adecuado, el cumplimiento del futuro ruido de la infraestructura debería quedar justificado mediante el estudio acústico que se adjunte como parte o anexo en la documentación de la EIA del proyecto ya que queda, además, reforzado con la resolución que emita el ministerio con competencias en medio ambiente, protegiendo el proyecto de disputas futuras.

Si la previsión genera dudas sobre el cumplimiento, o muestra algún posible incumplimiento, el estudio debe proponer medidas mitigadoras o correctoras, realistas y factibles, que sean convenientes. El órgano ambiental puede hacer obligatorias dichas medidas y el órgano sustantivo instar al promotor a llevarlas a cabo. Por tanto, la comunicación entre los desarrolladores del estudio acústico y el promotor del proyecto, debe ser honesta y realista en todo momento.

4. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO

En la evaluación de los niveles de ruido, se han de tener en cuenta las leyes y regulaciones vigentes sobre el ruido, en particular, la Ley 37/2003[3] y el Real Decreto 1367/2007 [5].

El estudio debe evaluar el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica y los valores límite, estos últimos solo en

proyectos de nueva construcción, establecidos para las infraestructuras aeroportuarias.

Se han de considerar los índices L_d , L_e , L_n para el análisis de los valores anuales (estimación del día medio de operación), diarios (estimación del día de máxima operación) y se estudiará el L_{max} para los proyectos de instalaciones nuevas. La mayoría de infraestructuras de este tipo opera exclusivamente en horario con luz solar (denominado de orto a ocaso) por lo que, si no es necesario evaluar el periodo nocturno (índice L_n), esto se indicará con la justificación correspondiente.

La evaluación de los niveles en fase de obra, si fuera necesaria, se realiza mediante cálculos con el método ISO 9613-2:1996.

El estudio en fase de explotación, para la caracterización del ruido de aeronaves, se ha de realizar mediante cálculos. Según indica el Anexo IV del RD 1367/2007 [5], la única forma de realizar una predicción es mediante cálculos, asimismo representar una situación promedio anual o diaria es complicado mediante mediciones, con lo cual, se genera un modelo en un programa de predicción de ruido que calcule las curvas de nivel de ruido para cada escenario particular.

El estudio se debe realizar para dos escenarios operativos: la puesta en marcha inicial del proyecto y el escenario de máxima actividad esperada

Sumado al modelo de predicción puede que sea necesario realizar mediciones “in situ”, una vez el proyecto esté autorizado y en explotación, teniendo en cuenta siempre los índices que se evalúan y sus periodos (L_{max} o niveles equivalentes a largo plazo, según cada tipo de estudio). Dichas mediciones, que se incluirán en el Plan o Programa de Vigilancia Ambiental (PVA), sirven para confirmar las predicciones realizadas con el modelo, y de esta manera tener una validación del mismo.

Los cálculos de ruido de aeronaves se realizan mediante las simulaciones de acuerdo a los métodos de cálculo establecidos en la Orden PCI/1319/2018 [7], que modifica el Anexo II del Real Decreto 1513/2005 [6] e incorpora al ordenamiento jurídico la Directiva Delegada (UE) 2021/1226 de la Comisión [8].

Se consideran válidos los modelos de cálculo basados en software que efectúen estos cálculos de acuerdo a estas referencias normativas y al documento 29 de la ECAC/CEAC. La guía indicada en [4] facilita alguno de estos programas de software, admitiendo temporalmente aquellos que no corresponden a la última versión del Anexo II del RD 1513/2005 [6], como el Integrated Noise Model (INM) de la Federal Aviation Administration (FAA).

Para este tipo de infraestructuras, los programas de predicción tienen más limitaciones en comparación con los estudios de aeropuertos, debido a la escasez de datos en su base de datos sobre modelos de aeronaves ligeras y falta de modelos de helicópteros. Por lo tanto la correspondencia entre el modelo real y el modelo simulado no siempre es la más análoga. Sin embargo, es el método de evaluación

aceptado normativamente y debe ser adaptado a cada caso concreto.

5. DATOS NECESARIOS DE LA INFRAESTRUCTURA

Los parámetros necesarios para generar el modelo son: los datos generales del aeródromo (punto de referencia del aeródromo, altitud de referencia, parámetros meteorológicos medios en el punto de referencia del aeródromo o próximos a dicho punto), datos del tráfico aéreo (número de movimientos y tipos de aeronaves), datos topográficos (algunas veces puede resultar necesario tener en cuenta las variaciones de la elevación del terreno).

El modelo de ruido requiere que cada movimiento diferente de la aeronave se describa mediante su trayectoria de vuelo tridimensional. Las aeronaves a simular pueden no encontrarse en la base de datos proporcionada, por lo que se deberán elegir las aeronaves equivalentes más similares acústicamente. El programa asignará la potencia variable del motor y su velocidad a cada tipo de aeronave y fase de vuelo.

A diferencia de los proyectos de aeropuertos en los que nos podemos guiar por datos obtenidos mediante el análisis de los datos de los radares, al simular los procedimientos de vuelos en aeródromos y helipuertos, las reglas de vuelo seguidas se corresponden con reglas visuales (VFR), con lo cual, en el caso de los aeródromos se simula el circuito de aeródromo y en helipuertos se simulan los rumbos marcados en el proyecto, datos que debe facilitar el gestor o promotor del proyecto.

Dadas las distancias de los resultados obtenidos en los proyectos, correspondientes a huellas de ruido que, en pocas ocasiones, superan valores de objetivos de calidad acústica o valores límites más allá de los 750 metros o 1500 metros desde la pista, algunas condiciones de estudio no son tan relevantes como en los estudios de grandes infraestructuras, como por ejemplo las condiciones meteorológicas (hasta los 100 metros son despreciables) y la definición exacta de la ruta, ya que la huella queda muy cerca de las instalaciones.

6. CALIDAD DEL INFORME Y RESULTADOS

Los estudios deberán recopilar no sólo una descripción de la situación acústica en fase de explotación, sino también de la situación previa a la actividad y de su fase de construcción, en el caso de ser aplicable.

Desde la perspectiva de la infraestructura, el informe debe describir tanto la infraestructura objeto de estudio (incluyendo instalaciones asociadas, pistas, puntos de estacionamiento de aeronaves, etc.) como la información operativa relacionada (el número de operaciones anuales, tipo de aeronaves, horarios operativos, circuito de aeródromo, porcentaje de uso de cabeceras, etc.).

Para la caracterización de la zona, se debe recopilar información sobre los emisores acústicos existentes que

puedan afectar al entorno (como otras infraestructuras de transporte, industrias o actividades) y, principalmente, las edificaciones existentes, la identificación de los usos del suelo y, si existe, la zonificación acústica establecida por los municipios competentes en la zona del proyecto.

En imprescindible especificar el método de cálculo utilizado y el software empleado, así como todas las hipótesis o equivalencias utilizadas en la simulación y su justificación.

Asimismo, es necesario respaldar los resultados del estudio con documentación gráfica, con planos con suficiente resolución para poder evaluar la afección en el entorno, información cartográfica, imágenes y toda la información necesaria que permita analizar y evaluar de forma rápida y concluyente la afección de ruido en cada escenario.

Se debe identificar claramente, en el análisis de los resultados, aquellas edificaciones y usos afectados por los distintos niveles aplicables (residencial, educativo, etc.) en términos de objetivos de calidad acústica o valores límite correspondientes, y basar en dichas afecciones las conclusiones y medidas preventivas o correctoras necesarias.

7. MEDIDAS PREVENTIVAS, CORRECTORAS Y SEGUIMIENTO

Una vez identificados y valorados los potenciales impactos acústicos en el entorno, se han proponer en el estudio acústico tanto las medidas preventivas como las correctoras que permitan cumplir con los objetivos y/o límites de calidad acústica en el entorno de estos aeródromos y helipuertos.

Estas medidas, que abarcan tanto la fase de construcción como la de explotación, han de estar dentro de los principios de objetividad, equidad y proporcionalidad. Todo ello contando con la conformidad del promotor y sin menoscabo del cumplimiento normativo que es de aplicación, teniendo en cuenta que estas medidas propuestas, con alta probabilidad, serán recogidas posteriormente por el órgano ambiental en su resolución.

El órgano ambiental puede considerar que las medidas propuestas en el *estudio* no son adecuadas y/o suficientes, pudiendo en ese caso incorporar en la consecuente resolución ambiental nuevas medidas.

Algunas de las medidas, cuando sean necesarias, que pueden ser propuestas, o incorporadas por el órgano ambiental, siempre que sean viables dentro de las características técnicas y operativas del proyecto, son:

- Uso de configuraciones de pista preferentes
- Limitación de horarios de obra /de operación.
- Modificación de umbrales
- Evitar el sobrevuelo de poblaciones o zonas protegidas, si lo permiten las maniobras de despegue o aterrizaje.
- Medidas informativas y de concienciación a los pilotos.

Así mismo, en el caso de que el proyecto se tramite con una evaluación ambiental ordinaria, es necesario definir un

Plan o Programa de Vigilancia Ambiental (PVA) que permita verificar el cumplimiento de las medidas acústicas definidas en el EsIA. Para ello es necesario identificar de manera cuantificada y simple, aspectos como la periodicidad con la que se debe llevar a cabo el seguimiento acústico establecido, valor umbral o normativo a seguir, metodología, documentación generada, etc.

Teniendo en cuenta el tipo de infraestructura que es objeto de análisis, durante la fase de obra suele ser necesario verificar el estado de la maquinaria de obra, con el fin de reducir sus niveles sonoros, así como velar por el cumplimiento de buenas prácticas en relación con la generación de ruido producidos durante esta fase. Durante la fase de explotación, la principal medida contemplada suele ser la realización de mediciones de seguimiento anual o en su defecto la revisión de las isófonas asociadas con la operativa del año civil anterior.

En caso de que sea necesario, el PVA podrá definir o recoger nuevas medidas que eviten o corrijan las posibles afecciones acústicas no consideradas inicialmente durante el estudio de impacto ambiental.

8. ERRORES COMUNES

A continuación, se listan varios errores que se han observado en estudios acústicos presentados ante la autoridad y que han propiciado la subsanación de los mismos:

- No tener en cuenta si el proyecto corresponde a una infraestructura nueva o modificada ➔ Los niveles e índices a evaluar deben ajustarse, según cada caso, a valores límite u objetivos de calidad acústica
- Utilizar mediciones para caracterizar la futura fase de operación ➔ El estudio debe representar el futuro ruido de la infraestructura debido a la puesta en marcha del proyecto y, por tanto, la predicciones sólo pueden realizarse mediante cálculos de acuerdo a la norma establecida [5].
- Utilizar mediciones en lugares remotos, sin población, para caracterizar la situación acústica actual en infraestructuras cuyo proyecto es una modificación ➔ La comparación entre la situación actual y futura debe realizarse en zonas residenciales cercanas y zonas educativas, culturales o sanitarios cercanos, utilizando como referencias las Figuras 1, 2, y 3. En el caso de no contar con edificaciones en esas zonas, se puede medir en puntos de ese perímetro como referencia.
- No utilizar el método de cálculo para ruido de aeronaves del anexo II del Real Decreto 1513/2005 [6] de acuerdo a los modelos que permite la autoridad en [4] ➔ Es importante utilizar el método de cálculo establecido por la normativa vigente. Las adaptaciones para ruido aeronáutico utilizando el método para ruido industrial (ISO 9613-2) no se aceptan actualmente por la autoridad. Los intentos

de caracterizar la emisión de una aeronave a partir de mediciones hechas con operaciones reales, o de documentación del certificado de ruido de la aeronave, es erróneo y da por invalidado el estudio.

- Ofrecer únicamente datos en receptores puntuales y no facilitar isófonas gráficamente sobre planos. ➔ Se debe mostrar toda la posible afección en el entorno.
- No facilitar en el informe los datos que han sido usados para la simulación: número de aeronaves, flota, usos de pista, etc... ➔ Puede dar lugar a repetidas solicitudes de información adicional de la autoridad.
- No indicar los índices, el periodo de estudio o el escenario, que se representan en los mapas de resultados. ➔ La falta de esta información dificulta la valoración del cumplimiento de los requisitos establecidos.
- Realizar comparaciones de mediciones de corta duración o de eventos con niveles equivalentes a largo plazo. ➔ Es incorrecto pues son indicadores de periodos temporales diferentes, no comparables.
- Presentar las isófonas en planos sin resolución y no mostrar en los mapas la huella completa o las poblaciones cercanas. ➔ No permite valorar la afección en todo el entorno posiblemente afectado.
- Proponer medidas relacionadas con el mantenimiento o modificación de las aeronaves. ➔ Las aeronaves deben cumplir con normativa muy estricta de aeronavegabilidad, que no permite nada distinto de lo aprobado para su mantenimiento, sus componentes, productos y equipos.

9. CONCLUSIONES

Los estudios acústicos deben ser presentados junto con la documentación ambiental, dentro del trámite de evaluación ambiental, para la autorización de proyectos de nueva construcción o modificación de infraestructuras aeronáuticas de tipo restringido, salvo excepciones permitidas por la autoridad competente (AESA).

La calidad de estos estudios puede condicionar la resolución ambiental y por tanto la autorización de todo el proyecto.

Las particularidades de los proyectos de infraestructuras de uso restringido hacen que su evaluación acústica mediante simulaciones no sea tan compleja como la de grandes aeropuertos. Sin embargo, es necesario conocer determinadas características de la instalación y de su operativa.

La calidad de estudios acústicos depende en gran medida de su conformidad con la normativa aplicable, principalmente con el Real Decreto 1367/2007 [5], de manera que la evaluación de los niveles de ruido de la operación de la infraestructura se ha de realizar con los índices adecuados, a través de métodos de evaluación mediante cálculos y

valorando el cumplimiento de acuerdo al tipo de proyecto presentando, nuevo o existente.

Los informes que se recogen en el estudio acústico han de contener los elementos suficientes para que, tanto la autoridad como el órgano ambiental, tengan la información adecuada para decidir sobre la adecuación del proyecto, su cumplimiento con la normativa de ruido ambiental y las medidas preventivas o correctoras, de ser necesarias.

10. REFERENCIAS

[1] Boletín Oficial del Estado núm. 176, Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea, versión consolidada de 02/08/2022.

[2] Boletín Oficial del Estado núm. 296, Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, versión consolidada de 14/06/2023.

[3] Boletín Oficial del Estado núm. 276, Ley 37/2003, del Ruido de 17 de noviembre.

[4] Agencia Estatal de Seguridad Aérea, “*Tramitación Ambiental de Proyectos de Aeródromos y Helipuertos*” <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/sostenibilidad/evaluacion-ambiental/material-guia-de-aea>, Madrid, Spain.

[5] Boletín Oficial del Estado núm. 254, Real Decreto 1367/2007 por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, de 19 de octubre. versión consolidada de 26/07/2012.

[6] Boletín Oficial del Estado núm. 301, Real Decreto 1513/2005 por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental, de 16 de diciembre. Versión consolidada de 10/02/2022.

[7] Boletín Oficial del Estado número 300 de 13 de diciembre de 2018 publica la Orden PCI/1319/2018, de 7 de diciembre, por la que se modifica el Anexo II del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación del ruido ambiental.

[8] Diario Oficial de la Unión Europea <<DOUE>> número 269, de 28 de julio de 2021, Directiva Delegada (UE) 2021/1226 de la Comisión de 21 de diciembre de 2020 por la que se modifica, para adaptarlo al progreso científico y técnico, el anexo II de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en cuanto a los métodos comunes para la evaluación del ruido.

ALEGACIONES A DECLARACIONES ZPAE - ZAS DEBIDO AL OCIO EN AGLOMERACIONES URBANAS

Fernando López Santos¹

Isabel Giménez Anaya²

SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L.

¹ flopez@sincosur.es

² isabel@sincosur.es

RESUMEN

El ruido generado por las actividades de ocio en las ciudades se ha convertido un problema de primer nivel para los diferentes ayuntamientos. La normativa vigente nos permite contar con instrumentos que posibilitan la lucha contra este tipo de ruido dañino para la ciudad, concretamente la declaración de zonas “de protección acústica especial”, “Acústicamente Saturadas” o de “Situación Acústica Especial”. Declarar un espacio de la ciudad como una de estas zonas, choca frontalmente con las asociaciones de hosteleros, restaurantes y bares de ocio de la ciudad, las cuales se defienden con las correspondientes alegaciones en periodo de exposición pública. En la presente comunicación se presentan aquellos aspectos más relevantes de estas alegaciones, los errores más frecuentes de dichas alegaciones y como defender nuestro trabajo como técnicos acústicos frente a la administración e incluso ante los tribunales de justicia.

ABSTRACT

Noise generated by leisure activities in cities has become a major problem for different city councils. The current regulations allow us to have instruments that make it possible to fight against this type of noise that is harmful to the city, specifically the declaration of "special acoustic protection", "Acoustically Saturated" or "Special Acoustic Situation" areas. Declaring an area of the city as one of these zones, clashes head-on with the associations of hoteliers, restaurants and leisure bars in the city, which are defending themselves with the corresponding allegations in the public exhibition period. This communication presents the most relevant aspects of these allegations, the most frequent errors in these allegations and how to defend our work as acoustic technicians before the administration and even before the courts of justice.

Palabras Clave— ZAS, ZPAE, RUIDO OCIO

1. INTRODUCCIÓN. MARCO NORMATIVO

El Marco normativo que regula la declaración de Zonas Acústicas Especiales [1] las define según el Artículo 25.

Zonas de Protección Acústica Especial de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, punto 1: las áreas acústicas en las que se incumplan los objetivos de calidad acústica, aún observándose por los emisores acústicos los valores límite aplicables, serán declaradas zonas de protección acústica especial por la Administración pública competente.

Existen normativas autonómicas que han definido otra figura como zona acústica especial, por ejemplo las Zonas Acústicamente Saturadas que en Andalucía, están definidas en el Artículo 20. Zonas acústicamente saturadas, del Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía (Decreto 6/2012, de 17 de enero), Punto 1: De conformidad con lo dispuesto en el artículo 76.1 de la Ley 7/2007, de 9 de julio, serán declaradas zonas acústicamente saturadas aquellas zonas de un municipio en las que como consecuencia de la existencia de numerosas actividades destinadas al uso de establecimientos públicos y en las que, a pesar de cumplir cada una de ellas con las exigencias de este Reglamento en relación con los niveles transmitidos al exterior, los niveles sonoros ambientales producidos por la concentración de las actividades existentes, y por las de las personas que las utilizan, sobrepasen los objetivos de calidad acústica, cuando excedan o igualen los valores establecidos en la siguiente tabla para el periodo nocturno, en función del área de sensibilidad acústica en que se encuentren incluidas:

Tabla III

Valores límite para la declaración de zonas acústicamente saturadas

Tipo de área de sensibilidad acústica [1]	$L_{eq}(dB(A))$
a	50
a	55
c y d	65
b	70

[1] Según la tipología recogida en el artículo 7.

Estas definiciones determinan el estudio que se debe realizar sobre este tipo de áreas, pasando inexorablemente por comprobar los Objetivos de Calidad Acústica, de acuerdo al área de sensibilidad acústica existente dentro de dicha área, conforme al Artículo 14. Objetivos de calidad acústica para

ruido aplicables a áreas acústicas y el Artículo 15. Cumplimiento de los objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a áreas acústicas, ambos del Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003

2. METODOLOGIA DETERMINACION ZONA ACUSTICA ESPECIAL: ZPAE-ZAS

Para verificar este cumplimiento de objetivos de calidad acústicas aplicada a estas áreas, de acuerdo al marco normativo español, se debe realizar una campaña de medidas acústicas siguiendo los métodos de evaluación descritos en el Anexo IV. Métodos y procedimientos de evaluación para los índices acústicos del Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, concretamente cumpliendo el punto 3.4.1. Evaluación de los índices de ruido referentes a objetivos de calidad acústica en áreas acústicas.

Atendiendo a la finalidad de este estudio las mediciones deben cumplir las siguientes normas:

- a) Se realizará una evaluación preliminar mediante mediciones en continuo durante al menos 24 horas, correspondientes a los episodios acústicamente más significativos, atendiendo a la fuente sonora que tenga mayor contribución en los ambientes sonoros del área acústica.
- b) Se determinará el número de puntos necesarios para la caracterización acústica de la zona atendiendo a las dimensiones del área acústica, y a la variación espacial de los niveles sonoros.
- c) El micrófono se situará preferentemente a 4 metros sobre el nivel del suelo, fijado a un elemento portante estable y separado al menos 1,20 metros de cualquier fachada o paramento que pueda introducir distorsiones por reflexiones en la medida. Para la medición se podrán escoger otras alturas, si bien éstas no deberán ser inferiores a 1,5 m sobre el nivel del suelo, y los resultados deberán corregirse de conformidad con una altura equivalente de 4 m. En estos casos se justificarán técnicamente los criterios de corrección aplicados.

Como se puede ver no hay un número mínimo de mediciones tanto de larga duración como de corta duración, dejando al criterio del técnico autor del estudio, sin embargo existen normativas autonómicas que si determinan el número de mediciones e incluso proponen desviaciones sobre objetivos de calidad acústica concretos.

Así la comunidad autónoma de Andalucía en la GUIA TECNICA DE APLICACIÓN DEL DECRETO 6/2012 ANDALUZ:

- d) Evaluaciones de la contaminación acústica a nivel del primer piso de viviendas, o bien en planta baja si fuera

vivienda de una sola planta. El número de medidas a realizar en cada calle o zona vendrá definido por la longitud de ésta, siendo necesario un mínimo de tres puntos por calle o zona. Se realizarán mediciones en todos los cruces de calles, así como un número de medidas entre ambos cruces de calles, teniendo en cuenta que la distancia máxima de separación entre dos mediciones sea de 50 m. Las mediciones se realizarán al tresbolillo en cada una de las aceras de las calles. Si sólo hubiera una fachada, se realizarán en ésta.

e) Se realizarán evaluaciones bajo las siguientes situaciones: una evaluación durante un período de fin de semana en horario nocturno, y otra en días laborales en horario nocturno. Para ambas valoraciones se utilizarán idénticos puntos de medida e idénticos períodos de evaluación.

Se considerará que existe afección sonora importante y por lo tanto, podrá ser la zona considerada como zona acústicamente saturada, cuando se excedan o iguallen los valores establecidos en la tabla incluida en el apartado valores establecidos para su declaración.

La Comunidad autónoma de Castilla y León en la Ley 5/2009, de 4 de junio, del ruido de Castilla y León, Artículo 49. Zonas acústicamente saturadas (ZAS):

- c) Estudio que valore los niveles continuos equivalentes durante el periodo en que se manifiestan las molestias (día, tarde o noche) y su comparativa con los valores límite establecidos en las tablas del Anexo II. Para la realización de dicho estudio deberán realizarse medidas, al menos, en tres puntos de la zona, ubicados a cuatro metros de altura o en los balcones o ventanas de viviendas y separados entre ellos más de 25 metros. En cada uno de dichos puntos deberá medirse el Leq (A), de forma continua, durante todo el periodo horario de evaluación (día, tarde o noche). Dichas medidas deberán repetirse en cada punto al menos durante dos días correspondientes a dos semanas distintas, no pudiendo existir un plazo superior a 15 días entre medidas.

Una vez realizadas las campañas de mediciones, se deberán integrar dentro de un estudio técnico que posibilite la declaración como ZPAE o ZAS.

3. DECLARACION ZPAE- ZAS: ESTUDIO TECNICO, EXPOSICION PUBLICA

El contenido del estudio técnico necesario para que la administración competente pueda declarar un área como zona acústica especial (ZPAE-ZAS) en la normativa estatal lo deja a criterio del técnico acústico, a modo de ejemplo traemos a continuación el índice del estudio acústico para declarar ZPAE en la ciudad de Logroño:

- 1.- introducción
- 2.- objeto del documento
- 3.- análisis previo a la propuesta de declaración de zonas de protección acústica especial
- 4.- determinación de las áreas acústicas donde se incumplan los objetivos de calidad acústica
 - 5.- delimitación de las zonas de estudio como posibles zonas acústicas especiales
 - 6.- descripción y caracterización acústica de los focos de ruido presentes en las zonas de estudio
 - 7.- evaluación de los niveles sonoros ambientales a través de los índices acústicos L_d , L_e , L_n .
 - 7.1.-medidas acústicas de larga duración
 - 7.2.-medidas de corta duración
- 8.- análisis de la situación acústica ambiental
 - 8.1.-niveles acústicos obtenidos de los registros de las estaciones de monitoreo (medidas de larga duración)
 - 8.2.-niveles acústicos obtenidos de las medidas de corta duración
 - 8.3.-comparación de los resultados obtenidos con los límites establecidos
- 9.- definición zona de protección acústica especial
- 10.- equipo redactor
- 11.- conclusiones
- 12.- anexo I: planos
- 13.- anexo II: mediciones larga duración
 - 13.1.- estación de monitorización 05
 - 13.2.- estación de monitorización 06
 - 13.3.- estación de monitorización 07
 - 13.4.- estación de monitorización 08
 - 13.5.- estación de monitorización 09
 - 13.6.- estación de monitorización 10
 - 13.7.- estación de monitorización 11
 - 13.8.- estación de monitorización 12
- 14.- anexo III: mediciones de corta duración

Sin embargo, en otras normativas autonómicas, como la andaluza, está perfectamente tabulado, por ejemplo, atendiendo a lo dispuesto en la Instrucción Técnica 3 del Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía (Decreto 6/2012, de 17 de enero), el contenido mínimo de los estudios para declarar Zonas Acústicamente Saturadas y Zonas de Protección Acústica Especial, se especifica en el punto 5:

5. Estudios de Zonas Acústicas Especiales.
 - a) Caracterización del Área Acústica en que se encuentra enclavada la Zona Acústica Especial.
 - b) Descripción y caracterización acústica de los focos de ruido y su horario de funcionamiento.
 - c) Evaluación de los niveles sonoros ambientales a través de los índices acústicos L_d , L_e y L_n , mediante un plan de medida «in situ», en los puntos necesarios que permitan identificar con detalle la situación acústica medioambiental en la zona. En uno de los puntos es

aconsejable que la medición se realice durante un mínimo de 24 horas en continuo. En la medida de lo posible, los puntos de muestreo elegidos deberían permitir la repetición de las medidas para los estudios de comprobación de la eficacia de los planes de acción.

d) Se valorarán los ruidos que por efectos indirectos pueda ocasionar las actividades existentes, con objeto de proponer las medidas correctoras adecuadas en los correspondientes planes de acción, para evitarlos o disminuirlos.

e) Análisis de la situación acústica ambiental.

f) Se realizará mediante la comparación de la situación acústica ambiental obtenida de las mediciones, con los límites establecidos para el área acústica correspondiente.

g) Documentación anexa:

1. Plano de situación de la zona.
2. Plano donde se identifiquen los distintos focos emisores.
3. Representación de las líneas isofónicas de los niveles resultantes.

Una vez realizado el estudio técnico la administración competente tendrá la obligación, conforme al Artículo 5: Información de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, de someter a información pública el estudio, por ejemplo:



Figura 1. Publicación en Boletín estudio ZPAE Logroño.

4. ALEGACIONES

Según el Artículo 25. Zonas de Protección Acústica Especial de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, punto 3: Las Administraciones públicas competentes elaborarán planes zonales específicos para la mejora acústica progresiva del medio ambiente en las zonas de protección acústica especial, hasta alcanzar los objetivos de calidad acústica que les sean de aplicación. Los planes contendrán las medidas correctoras que deban aplicarse a los emisores acústicos y a las vías de propagación, así como los responsables de su adopción, la cuantificación económica de aquéllas y, cuando sea posible, un proyecto de financiación.

Punto 4: Los planes zonales específicos podrán contener, entre otras, todas o algunas de las siguientes medidas:

a) Señalar zonas en las que se apliquen restricciones horarias o por razón del tipo de actividad a las obras a realizar en la vía pública o en edificaciones.

b) Señalar zonas o vías en las que no puedan circular determinadas clases de vehículos amotor o deban hacerlo con restricciones horarias o de velocidad.

c) No autorizar la puesta en marcha, ampliación, modificación o traslado de un emisor acústico que incremente los valores de los índices de inmisión existentes.

Para aquellas zonas ZAS, reguladas por normativas autonómicas, se plantean medidas tales como la definidas en el artículo 20: Zonas Acústicamente Saturadas del DECRETO 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía:

a) Prohibición o limitación horaria de colocar mesas y sillas en la vía pública, así como suspensión temporal de las licencias o medios de intervención administrativa en la actividad correspondientes concedidos para su instalación en la vía pública.

b) Establecimiento de restricciones para el tráfico rodado.

c) Establecimiento de límites de inmisión más restrictivos que los de carácter general, exigiendo a los titulares de las actividades las medidas correctoras complementarias.

d) Para aquellas actividades generadoras de ruido en horario nocturno, suspensión del otorgamiento de nuevas licencias de apertura, así como de modificación o ampliación, salvo que lleven aparejadas disminución de los valores de inmisión.

e) Limitación del régimen de horarios de acuerdo con la normativa vigente en materia de Espectáculos Públicos y Actividades Recreativas de Andalucía.

Como puede observarse las posibles actuaciones correctoras que definen y desarrollan los planes zonales de zonas acústicas especiales (ZPAE-ZAS) chocan con las actividades presentes en dichas zonas, fundamentalmente la actividad hostelera. De ahí que las principales alegaciones que se presentan a los estudios de declaración ZPAE-ZAS y sus correspondientes planes zonales vengan promovidas por asociaciones de hosteleros o similar.

En base a nuestra experiencia por declaraciones ZPAE-ZAS en Murcia, Logroño, Málaga, Algeciras, las argumentaciones más comunes que se realizan en dichas alegaciones atienden a:

- Sobre la metodología siempre aparece la “evaluación de actividad” con sus correspondientes métodos de medición: ruido de fondo, correcciones tonales, etc...
- Sobre la campaña de medidas: numero y periodo temporal, porque aquí y no allí, porque 20 puntos en vez de 10, por que una duración 2 semanas en vez de 3, periodo de evaluación de los niveles acústicos,

etc.. que si dentro de los locales, que si fuera, que si con puertas abiertas o cerradas, etc.. Condiciones meteorológicas, ...

- El equipamiento: sonómetros tipo I, no a estaciones de monitorización, calibración, etc..
- Equiparan el ruido de ocio a una actividad, conforme a la definición de la normativa de ruidos.
- Mezclan conceptos del mapa estratégico de ruidos con mapas de ruido de ocio
- Si existe un mapa de ruido de ocio, cuestionan la metodología.
- No consideran las actividades como emisores acústico (artículo 3 de la ley del ruido
- Etc.

4. RESPUESTA ALEGACIONES

La respuesta a las alegaciones debe considerar la metodología utilizada, la normativa vigente tanto nacional, autonómica como local, y las propias características de la zona declarada ZPAE-ZAS. Las respuestas deben ser técnicamente objetivas y no contener ningún tipo de sesgo personal o político. Los principales argumentos y fundamentos a tener en cuenta:

- Se trata siempre de comprobar Objetivos de Calidad Acustica, no hay que medir en interior de locales.
- El ruido del Ocio no es una actividad
- El ruido de Ocio no puede figurar en un Mapa Estratégico de Ruidos (no es un emisor de los considerados en el Anexo IV: Requisitos mínimos sobre el cartografiado del ruido del Real Decreto 1513/2005)
- No existe una metodología para la elaboración de un Mapa de Ruido de Ocio
- El periodo de evaluación de los índices acústicos no tiene que durar 1 año, existen métodos de muestreo del nivel de presión sonora de acuerdo con los métodos de evaluación especificados en el Anexo IV del RD 1367/2007.
- Se pueden utilizar estaciones de monitorización y sonómetros siempre que sean tipo I
- No se debe confundir Plan Zonal con Plan de Acción consecuente al mapa estratégico de ruidos.

Estas respuestas se deben realizar con el mayor rigor técnico posible, ya que es probable que terminen en un juzgado, si las asociaciones alegantes, no admiten dichas respuestas, les queda la vía judicial.

En este caso, el éxito de conseguir un respaldo judicial a nuestro estudio pasa inexorablemente por una defensa de nuestro trabajo, el cual debe ser realizado bajo el marco normativo vigente, teniendo en cuenta que la defensa ante un tribunal solo se basa en lo incluido en el estudio y no permite basarse en suposiciones o convicciones. El juez se apoya en

los hechos y evidencias científicas presentes en el estudio, para dictar sentencia. Es muy importante en el momento de comparecer ante el juez como técnico autor del trabajo, estar totalmente seguro del resultado de nuestro trabajo y no presentar fisuras ante las preguntas capciosas de los abogados defensores, que intentan poner en entredicho tus conocimientos técnicos, el equipamiento utilizado, la metodología aplicada, etc.

Sola una solida convicción técnica del trabajo realizado permitirá conseguir el fallo a favor de nuestro estudio.



Figura 2. Sentencia STSJ MU 261/2021 del Tribunal Superior de Justicia de Murcia a favor del Ayuntamiento de Murcia por la declaración de ZPAE en base al estudio de SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L.

6. CONCLUSIONES

Como se ha podido ver a lo largo de la comunicación la declaración de un área como zona especial (ZPAE-ZAS) requiere un estudio técnico que identifique las fuentes acústicas presentes en el área y responsable de los incumplimientos de Objetivos de Calidad Acústica, definir una campaña de mediciones acorde a la normativa del lugar donde se asiente la zona, prestando especial atención a la duración de las mediciones y la ubicación de los puntos a medir, realizar un tratamiento y análisis de los resultados obtenidos, comprobando el incumplimiento o no de los Objetivos de Calidad Acústica, redactando un estudio que incluya todos los trabajos realizados, que permita definir un plan zonal que plantee actuaciones y medidas correctoras de las previstas en la normativa vigente en base a las fuentes acústicas que generen el incumplimiento.

No se debe olvidar que el ruido del ocio no es una actividad, no existe una metodología para elaborar Mapas de Ruido de Ocio, la evaluación de índices acústicos se puede realizar mediante un muestreo, no es necesario medir durante un año y hay que buscar el consenso entre los diferentes autores implicados en la problemática, de forma que el plan zonal consiga el equilibrio entre el derecho a las personas al descanso y el derecho al trabajo y al ocio.

7. AGRADECIMEINTOS

Al Excmo. Ayuntamiento de Murcia, de Logroño y de Málaga.

8. REFERENCIAS

- [1] Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. «DOUE» núm. 189, de 18 de julio de 2002, páginas 12 a 25. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. «BOE» núm. 276, de 18 de noviembre de 2003, pp. 40494 - 40505. Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. «BOE» núm. 301, de 17 de diciembre de 2005, pp. 41356 - 41363. Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. «BOE» núm. 254, de 23 de octubre de 2007, pp. 42952 – 42973.
- [2] Giménez, I.; López, F.; Carretero de la Rocha, D., Estudio Acústico de la zona peatonal del centro de Logroño. SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L. – 45º Congreso Español de Acústica, TECNIACÚSTICA, Murcia. (2014)
- [3] López Santos, Fernando , Giménez, I.; Carretero de la Rocha D., Special Acoustics Area: The Center of the Malaga City (Spain). SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L. – Noise: Paper ICA2016-0901
- [4] Juan Manuel Martínez Martínez (Ayuntamiento de Murcia, Servicio de Medio Ambiente); Fuensanta Vizuete Cano (Ayuntamiento de Murcia, Servicio de Medio Ambiente); Antonio Javier Navarro Corchón (Ayuntamiento de Murcia, Concejalía de Urbanismo, Medio Ambiente, Agua y Huerta); Francisco Carpe Ristol (Ayuntamiento de Murcia, Servicio de Medio Ambiente); Fernando López Santos (SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L.); Isabel Giménez Anaya (SINCOSUR Ingeniería Sostenible, S.L.). Elaboración del Mapa de Ruido de Ocio de la Ciudad de Murcia. CONAMA 2018.

INFLUENCIA DE LA ALTURA DEL MICRÓFONO EN MEDIDAS DE RUIDO AERONÁUTICO

Jaime Vargas Calderón^{1*}
María Jesús Ballesteros Garrido¹

¹Envirosuite Ibérica S.A.U.

RESUMEN

El nivel de ruido avión medido en el entorno aeroportuario puede verse influenciado por la altura del micrófono de medida. El Real Decreto 1367/2007 [1] establece que la altura de medida para ruido ambiental será de 4m, sin embargo, la ISO 20906:2009 [2], relativa al monitorado de ruido en el entorno aeroportuario, recomienda una altura de medida superior a 6m sobre suelo poroso. Finalmente, OACI [3] establece que las medidas de certificación de aeronaves se realizan a 1,2m.

Ante esta variabilidad de recomendaciones, y teniendo en cuenta la significativa distancia a la fuente sonora y el alto contenido en bajas frecuencias de este tipo de ruido, resulta interesante conocer qué influencia tendrá la altura de medida en los niveles de ruido registrados para distintos ángulos de incidencia y sobre suelo duro.

Se ha realizado un estudio en el que se realizan medidas simultáneas a distintas alturas a fin de determinar cómo afecta esta a los niveles de ruido avión medidos. Esto supone un gran avance a la hora de realizar este tipo de medidas o cuantificar su incertidumbre en aquellos casos en los que no se pueda alcanzar la altura óptima.

ABSTRACT

The level of aircraft noise measured in the airport environment can be influenced by the height of the measuring microphone. Royal Decree 1367/2007 [1] establishes that the measuring height for environmental noise shall be 4 meters. However, ISO 20906:2009 [2], related to aircraft noise monitoring in the airport environment, recommends a measuring height of over 6m above porous ground. Finally, ICAO [3] establishes that aircraft certification measurements are carried out at 1.2m.

Given this variability in recommendations and considering the significant distance from the sound source and the high content of low frequencies in this type of noise, it is interesting to understand the influence that measuring

height will have on the recorded noise levels for different angles of incidence and on hard ground.

A study has been conducted in which simultaneous measurements are taken at different heights to determine how this affects the measured aircraft noise levels. This represents a significant advancement in conducting such measurements or quantifying their uncertainty in cases where the optimal height cannot be achieved.

Palabras Clave— altura de medida, suelo duro, ángulo de incidencia, ISO 20906.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido aeronáutico es una preocupación ambiental y de salud pública cada vez más relevante en las sociedades modernas. La medición precisa de los niveles de ruido aeronáutico es esencial para evaluar los impactos ambientales y para desarrollar estrategias efectivas de mitigación del ruido.

Uno de los factores más importantes que influyen en la precisión de las mediciones de ruido aeronáutico es la altura de medida, debido a las posibles reflexiones de las ondas sonoras en el suelo. En caso de no existir otras superficies reflectantes cercanas, el efecto que estas reflexiones tendrán sobre la energía acústica captada por el micrófono dependerá del ángulo de incidencia, la superficie de reflexión, la distancia y movimiento de la aeronave, la distribución frecuencial del sonido y los coeficientes de absorción, difusión y dispersión del suelo. Existen estudios, como el elaborado por R. Bütikofer y G. Thomann [4], que han demostrado que la altura del micrófono con respecto al suelo y a la trayectoria de vuelo de las aeronaves pueden tener un impacto significativo en los niveles de ruido registrados, en función del tipo de avión, distancia a la fuente y ángulo de incidencia. Sin embargo, estos estudios han sido realizados sobre suelo poroso, no conociéndose hasta el momento estudios que evalúen cómo influye la altura del micrófono cuando estos están instalados sobre suelo duro.

* **Autor de contacto:** Jaime.Vargas@envirosuite.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



Figura 1. Terminales de Monitorado de Ruido (TMR) instalados.

Con el propósito de minimizar el efecto de las reflexiones en la medición de ruido aeronáutico y mantener la incertidumbre de medida bajo control, la norma ISO 20906:2009 [2] establece recomendaciones específicas relacionadas con la altura y ubicación del micrófono. Concretamente, recomienda una altura de medida de entre 6 m y 10 m, así como la instalación del micrófono sobre suelo poroso y en aquellas ubicaciones en las que el ángulo de elevación sea mayor de 30°. En caso de que no sea posible cumplir estas recomendaciones, la ISO 20906:2009 [2] únicamente concluye que la incertidumbre de medida será mayor, pero no establece un valor de referencia.

El estudio realizado pretende cuantificar las diferencias existentes entre los niveles exposición sonora ponderado A (L_{AE}) medidos simultáneamente en tres monitores instalados a 6,9 m, 4 m y 1,2 m de altura y sobre suelo duro, a fin de comprobar experimentalmente cómo influyen las reflexiones en función de la altura de medida y el ángulo de incidencia en este tipo de suelo.

En la práctica, existen situaciones en las que no es posible instalar micrófonos con una altura igual o superior a 6 m, ya que existen limitaciones como idoneidad, permisos, disponibilidad eléctrica, accesibilidad y/o vandalismo, siendo por tanto común la instalación de micrófonos a 4 m de altura.

Por ejemplo, el Departamento de Investigación y Consultoría Ambiental (ERCD por sus siglas en inglés) de la Autoridad Civil de Aviación (CAA) del Reino Unido establece que, para la mayoría de los ensayos realizados de forma atendida, los micrófonos se instalan a 4 m de altura, a fin de reducir la influencia de las posibles reflexiones [5].

Por otro lado, aunque no esté orientada específicamente a la medición de ruido aeronáutico, el Real Decreto 1367/2007 [1] y la ISO 1996-2:2020 [6] establecen una altura de medida de 4 m para la medición del ruido ambiental.

En cuanto a los cálculos de niveles sonoros para la elaboración de mapas de ruido, la guía Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU) [7], establece que existe evidencia de que, para alturas entre 1,2 m y 4 m, la diferencia de niveles es inferior a 1 dB cuando las mediciones se realizan en suelo poroso y el ángulo de incidencia es superior a 15°. Sin embargo, también recoge que actualmente no hay una evaluación clara sobre la diferencia cuando se trata de suelos reflectantes o ángulos inferiores.

En otras ocasiones, aunque la altura del soporte que sustenta el micrófono sea de más de 6 m de altura, pueden existir superficies horizontales (p. ej. azoteas) que reduzcan la altura efectiva de medida.

2. METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología del estudio, se instalaron tres terminales de monitorización de ruido en el municipio de San Fernando de Henares, cerca del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Dicha ubicación fue seleccionada debido a la existencia de suelo duro y a la posibilidad de detectar tanto aterrizajes (configuración norte) como despegues (configuración sur) con diferentes ángulos de elevación.

Los tres equipos fueron configurados con el mismo umbral de detección y misma fuente de sincronismo. Para el estudio se emplearon dos B&K 3597-C y un B&K 3639-A, los cuales registran diferentes indicadores acústicos, siendo el L_{AE} el indicador estudiado.

Durante julio y agosto 2023 se registraron un total de 13.253 operaciones de forma simultánea en los tres equipos, lo que equivale a 39.759 eventos sonoros en total.

El sistema de monitorado de ruido del aeropuerto permite conocer la distancia más corta entre el micrófono y la aeronave (slant distance), así como el ángulo de elevación (β). También permite identificar qué tipo de aeronave ha generado cada evento. La Tabla 1 recoge los diez tipos de avión con mayor número de muestras.

Tabla 1. Número de operaciones registradas simultáneamente por tipo de avión (top 10).

Tipo avión	Nº operaciones
B738	2.754
A320	2.121
CRJX	926
A359	867
A332	728
B788	695
A319	669
A20N	651
B789	611
A21N	603
Total	10.625

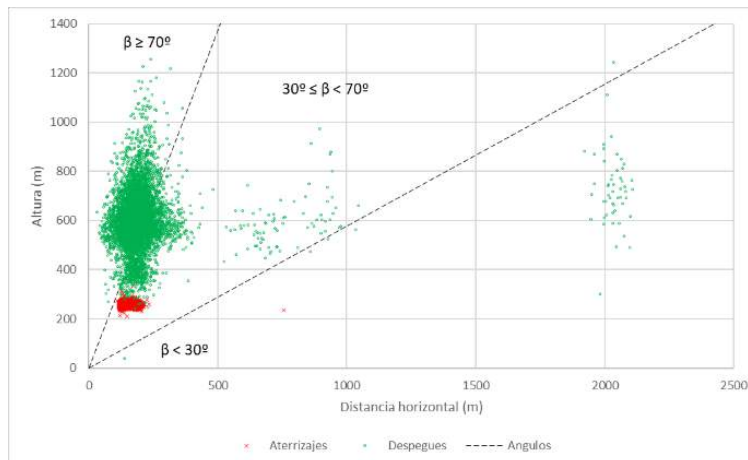


Figura 2. Posición y ángulo de elevación de cada aeronave respecto al micrófono situado a 6,9m.

Tabla 2. Media de las diferencias y error estándar de la media para los eventos aeronáuticos medidos a 6,9m, 4m y 1,2m por situación según el ángulo de elevación. \bar{X} : valor medio. N: número de muestras.

Situación	$\bar{X}(L_{AE_{6,9m}} - L_{AE_{4m}})$ dB	$\bar{X}(L_{AE_{6,9m}} - L_{AE_{1,2m}})$ dB	$\bar{X}(L_{AE_{4m}} - L_{AE_{1,2m}})$ dB	N
Sobrevuelo	$0,2 \pm 0,01$	$0,3 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,01$	4184
Lateral	$-0,5 \pm 0,01$	$-0,6 \pm 0,01$	$-0,1 \pm 0$	9015
Ángulo bajo	$-0,1 \pm 0,16$	$1,6 \pm 0,16$	$1,7 \pm 0,18$	54

Se han definido tres situaciones diferentes en función del ángulo de elevación β , a fin de analizar cómo afecta la altura de medida sobre suelo duro en cada caso:

- Sobrevuelo: ángulo de elevación β mayor o igual a 70° .
- Lateral: ángulo de elevación β mayor o igual a 30° y menor a 70° .
- Ángulo bajo: ángulo de elevación β menor a 30° .

La Figura 2 muestra la situación de cada aeronave en el instante en el que existe una menor distancia entre el micrófono situado a 6,9m. Como se puede apreciar, existe un mayor número de muestras para los ángulos superiores a 30° respecto a las operaciones registradas para ángulos menores a 30° . Esta situación es habitual, ya que los micrófonos suelen estar instalados para captar sobrevuelos siempre que sea posible.

El estudio se ha llevado a cabo en julio y agosto de 2023 debido a la estabilidad atmosférica que trae consigo el verano. La velocidad del viento no ha superado los 10 m/s en ninguno de los promedios quincenales, siendo 2 m/s la velocidad promedio. En cuanto a la temperatura, esta varía en función de la hora del día, encontrándose en el rango entre $14,2^\circ\text{C}$ y $40,2^\circ\text{C}$. Se ha llevado a cabo una revisión y validación de los datos, a fin de asegurar que no existen falsos positivos que puedan distorsionar los resultados.

3. RESULTADOS

Una vez validadas las muestras para el estudio, se calcularon las diferencias L_{AE} para cada una de las operaciones y para las tres alturas. La tabla 2 recoge el valor promedio de las diferencias en función del ángulo de elevación, así como el error estándar de la media. No se ha hecho diferenciación entre aterrizajes y despegues.

Las diferencias son mínimas para la situación de sobrevuelo, obteniéndose un nivel ligeramente más elevado para el micrófono que se encuentra a mayor altura. Tal y como cabría esperar, la mayor diferencia la encontramos entre el micrófono situado a 6,9m y el micrófono situado a 1,2m ($L_{AE_{6,9m}} - L_{AE_{1,2m}}$). Sin embargo, el resultado es muy similar para las tres alturas, por lo que se podría afirmar que la existencia de suelo duro no altera de forma significativa las mediciones de ruido avión en esta situación de sobrevuelo.

En cuanto a la situación de ángulo lateral, se obtienen mayores diferencias que en el caso anterior, aunque inferiores a 1 dB. En este caso, los micrófonos situados a 4m y 1,2m registran un nivel mayor respecto al micrófono de referencia, situado a 6,9m. Se comprueba, por tanto, que se produce una interferencia constructiva en los micrófonos situados más cerca del suelo debido a la alteración producida por el mismo.

Si se compara 4m con 1,2m, se observa que la diferencia es prácticamente nula, lo que indica que no existe diferencia entre medir a 4m o 1,2m

Por último, se observa que las diferencias son mayores cuando el ángulo es bajo y la altura de medida es 1,2m. En este caso, se produce una interferencia destructiva sobre el micrófono situado a 1,2m.

Al contrario que en el caso anterior, no existe una diferencia destacable entre medir a 6,9m o a 4m para esta situación de ángulo bajo.

4. CONCLUSIONES

La investigación realizada no permite establecer un criterio único sobre cómo influye la altura de medida cuando el micrófono se encuentra situado sobre suelo duro, ya que se ha comprobado que las diferencias varían en función del ángulo de elevación.

Como cabría esperar, las mayores diferencias se dan en aquellos casos en los que el micrófono se encuentra a 1,2m, aunque se ha comprobado que para la situación de ángulo lateral se produce una interferencia constructiva que aumenta el nivel resultante respecto al micrófono de referencia, y que no existe prácticamente diferencia respecto al micrófono situado a 4m.

En cuanto a la situación de ángulo bajo, se produce una interferencia destructiva sobre el micrófono de 1,2m respecto a los otros dos.

En cuanto al micrófono situado a 4m respecto al micrófono de referencia, la mayor diferencia se obtiene para la situación de ángulo lateral, siendo esta menor a 1 dB.

De esta forma se concluye que las diferencias entre medir a más de 6m, a 4m o a 1,2m son considerablemente bajas excepto para ángulo menores a 30° en cuyo caso, tal y como se indica en la ISO 20906:2009 [2], la incertidumbre aumenta significativamente.

5. REFERENCIAS

[1] España. Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Boletín Oficial del Estado, de 23 de octubre de 2007, núm. 254.

[2] ISO 20906 Acoustics - Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports, 2009.

[3] OACI (Organización de Aviación Civil Internacional): Protección del medio ambiente, anexo 16, volumen I, ruido de las aeronaves, 2017.

[4] R. Butikofer, and G. Thomann, "Aircraft Sound Measurements: The Influence of Microphone Height," Acta Acustica united with Acustica, Vol. 91, No. 5, 2005, pp. 907–914.

[5] S. White, "Precision of Aircraft Noise Measurements at the London Airports", ERCD REPORT 0506, 2005.

[6] ISO 1996-2 Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of sound pressure levels, 2020.

[7] F. Anfosso-Lédée, M. Paviotti, and S. Kephalopoulos, Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU) : to be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC, Publications Office, 2012.



CLASSIFICAÇÃO DE FONTES DE RUÍDO INDUSTRIAL COM TÉCNICAS DE MAPAS DE RUÍDO E BEAMFORMING

Luís Conde Santos, Jorge Preto ^{1*}

¹ dBwave.i - Acoustic Engineering, SA, Oeiras, Portugal (www.dbwave.pt)

RESUMO

O ruído é um dos aspetos ambientais em que parece mais difícil garantir o pleno cumprimento dos limites legais, especialmente em instalações industriais complexas com uma multiplicidade de fontes de ruído. Muitas vezes estão presentes características tonais, o que pode levar a uma penalização tonal de acordo com as normas de ruído. Este artigo descreve a aplicação conjunta de técnicas de modelação acústica de mapas de ruído e de técnicas de *beamforming* de câmaras acústicas, para identificar, localizar e classificar fontes de ruído industrial, incluindo aquelas com forte conteúdo tonal, mostrando como esse uso combinado pode ajudar no desenvolvimento de planos eficazes de redução de ruído para plantas industriais. O processo pode partir do desenvolvimento de um modelo acústico ao qual é aplicado um processo de validação baseado em ensaios com *beamforming* ou, ao revés, começar nas medições com *beamforming* e desenvolver o modelo acústico com base nessas medições. São apresentados e discutidos exemplos práticos.

ABSTRACT

Noise is one of the environmental aspects where it seems more difficult to guarantee full compliance with legal limits, especially in complex industrial plants with a multitude of noise sources. Very often tonal characteristics are present, which may lead to tonal penalty according to noise regulations. This paper describes the application of noise mapping combined with acoustic camera beamforming techniques, to identify, localize and rank industrial noise sources, including those with strong tonal content, showing how this combined use can help in the development of effective noise reduction plans for industrial plants. The process can start from the development of an acoustic model to which a validation process based on beamforming tests is applied or, on the contrary, start on beamforming measurements and develop the acoustic model based on these measurements. Practical examples are presented and discussed.

Palabras Clave - *beamforming*, mapas de ruído, localização de fontes de ruído, plano de ação de ruído, controlo de ruído industrial.

1. INTRODUÇÃO

As avaliações de ruído ambiental em torno de instalações industriais são geralmente realizadas através de medições de curto ou longo prazo na envolvente do local e perto de recetores sensíveis, como habitações, onde o cumprimento dos limites legais deve ser verificado. Normalmente, os limites legais relacionados com o incómodo causado pelo ruído nas imediações de uma fábrica (ou outra atividade ruidosa) podem ser estabelecidos em termos da diferença entre o ruído residual (fábrica off) e o ruído ambiente (fábrica on), tendo também em conta características específicas do ruído, como a tonalidade e impulsividade e, em alguns casos, o conteúdo de baixa frequência. Quando os limites legais são excedidos, a fábrica é obrigada a tomar medidas para reduzir as suas emissões sonoras.

As medidas de redução do ruído podem ser muito dispendiosas e, por conseguinte, devem ser cuidadosamente estudadas, para que sejam selecionadas as fontes de ruído certas e tomadas as medidas adequadas de controlo do ruído. Não o fazer leva normalmente a que uma empresa gaste muito dinheiro, que pode facilmente ascender a várias dezenas ou centenas de milhares de euros e acabar por não cumprir os critérios legais. Isto é particularmente verdadeiro em instalações industriais complexas, com um grande número de fontes de ruído, onde não é de todo possível descobrir quais são as fontes mais importantes apenas "por feeling", e, também, não se pode ligar e desligar cada fonte individualmente para medir suas contribuições separadas para o ruído ambiente observado próximo de habitações. Assim, para identificar e classificar corretamente as fontes de ruído e estabelecer um plano de ação realista de controlo do ruído, é necessário recorrer a técnicas avançadas de modelação e/ou medição.

* **Autor de contacto:** luis.conde@dbwave.pt

Copyright: ©2023 Luís Conde Santos et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

O desenvolvimento de técnicas de modelação computacional que simulam a emissão e propagação acústicas, permite modelar, atualmente, com bastante precisão e rapidez, os cenários mais complexos de geração e propagação de ruído [1]. Os resultados são normalmente apresentados sob a forma de mapas de ruído coloridos, correspondendo cada cor a um determinado intervalo de níveis de ruído, normalmente em classes de 5 dB. Acima de tudo, um modelo acústico, se corretamente desenvolvido, permite classificar as fontes de ruído, extrair as contribuições individuais de cada fonte de ruído para um determinado receptor, atualizar as informações sempre que mudanças são introduzidas na fábrica e estabelecer planos de ação detalhados de controle de ruído com resultados previsíveis. Também podem ser obtidos mapas de diferenças a partir do mesmo modelo, a fim de apresentar mapas de antes vs. depois, mapas de ruído ambiente vs. ruído residual, ou mapas de cenário 1 – cenário 2, etc. Ao classificar as fontes e prever o resultado prático de qualquer cenário, pode-se efetivamente otimizar o investimento em ações de controle de ruído.

Dito isto, o desenvolvimento de um modelo acústico fiável de uma fábrica, que possa ser efetivamente utilizado para estabelecer um plano de ação de ruído ambiental bem-sucedido, não é assim tão fácil. Obter os dados de entrada adequados é, como em qualquer modelo, a parte mais crítica do trabalho: a expressão "garbage in, garbage out" faz todo o sentido neste contexto [2]. Na prática, a potência sonora de cada fonte é estimada, a partir de medições de pressão sonora próximas da fonte, e eventualmente ajustada, após um processo de validação, para ajustar o modelo e torná-lo o mais próximo possível da realidade. Vale a pena dizer que o principal interesse em obter um modelo fiável e preciso reside em poder calcular corretamente as contribuições da fonte nos receptores relevantes, tal como habitações na envolvente próxima da fábrica. Neste caso, o processo de validação deve ter isso em conta.

Há situações, no entanto, em que um processo de validação do modelo por medições do nível de pressão sonora não é suficiente para ter certeza sobre os resultados ou, em outros casos, em que queremos realizar uma primeira verificação para confirmar quais são as áreas mais relevantes da fábrica para incluir no modelo. Noutras situações, pode-se ter dificuldades em identificar a origem de um tom de frequência específico que pode levar a uma penalização regulamentar ou, eventualmente, ter dúvidas sobre a influência da diretividade de alguma fonte sobre sua contribuição num determinado receptor, ou simplesmente não conseguir chegar a uma fonte para medi-la (por exemplo, chaminé de uma fábrica). Todas estas situações são casos em que pode ser muito útil fazer uso de técnicas adequadas de *beamforming* recorrendo a câmaras acústicas.

Este artigo resume as metodologias envolvidas, que têm vindo a ser aplicadas em vários tipos de indústrias, onde a aplicação de mapeamento de ruído, combinado com técnicas de *beamforming* de câmaras acústicas, tem sido utilizada para

identificar, localizar e classificar fontes de ruído industrial, mostrando como este uso combinado pode ajudar no desenvolvimento de planos eficazes de redução de ruído para instalações industriais. Tal é ilustrado com um caso prático.

2. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MAPAS DE RUÍDO

Para o desenvolvimento de um mapa de ruído industrial é necessário modelar todas as variáveis envolvidas no complexo problema ambiental que é o ruído, para que a previsão computacional obtida a partir do modelo físico de propagação sonora possa ser o mais precisa possível.

Os próximos parágrafos descrevem com mais detalhe as informações necessárias para a produção de um modelo acústico preciso e fiável.

Software: O software utilizado para a elaboração de mapas de ruído industriais, como por exemplo o CadnaA, é geralmente configurado definido para seguir a norma internacional recomendada para ruído industrial, ou seja, ISO 9613-2.

Topografia: Na elaboração de um mapa de ruído, são necessárias informações sobre a altimetria do terreno, incluindo curvas de nível e pontos cotados. A partir dessas informações, o modelo digital do terreno é construído e usado como base para a simulação.

Área do mapa: A área do mapa é a área definida como a área circundante na envolvente da unidade industrial. É escolhida de modo a poder considerar a influência sonora da fábrica nas áreas residenciais circundantes.

Dados sobre edifícios e outros elementos construtivos: Os edifícios pertencentes à fábrica, todos os edifícios residenciais e industriais circundantes, bem como alguns objetos de interesse como muros e taludes, que funcionam como "barreiras acústicas" na propagação do som ao ar livre, devem ser identificados e introduzidos no modelo.

Caracterização das fontes de ruído: O trabalho de campo é realizado para identificar todas as principais fontes de ruído da fábrica e avaliar a potência sonora emitida por cada fonte identificada. É criada uma base de dados de fontes de ruído com a informação técnica necessária para a modelação de cada fonte. Os níveis de pressão sonora, L_p , medidos perto de cada fonte, geralmente em bandas de terço de oitava, são posteriormente convertidos em níveis de potência sonora, L_w , tendo em conta as correções aplicadas ao tipo de fonte e tipo de propagação sonora.

Validação/calibração do modelo: um modelo acústico preciso depende fortemente da qualidade dos dados de entrada. Para reduzir as incertezas associadas à estimativa dos níveis de potência sonora das fontes, obtidos a partir de medições de nível sonoro em campo próximo, um extenso processo de validação/calibração é implementado depois que todos os dados de entrada são introduzidos no modelo e um primeiro cálculo de mapa é feito. A validação do modelo acústico é feita comparando os níveis de pressão sonora

medidos no campo com os valores calculados nos mesmos pontos, tendo em conta as condições reais de funcionamento da instalação durante essas medições de campo.

A partir do modelo, é então possível identificar, caracterizar e classificar todas as fontes de ruído relevantes com base na sua influência acústica em pontos recetores relevantes em torno da fábrica. Normalmente, estes estão localizados nos limites de propriedade da instalação e/ou em recetores sensíveis (como casas), em determinados locais.

Depois de comparar os níveis de ruído previstos em recetores relevantes com critérios estabelecidos e ter identificado e classificado as fontes de acordo com as suas contribuições individuais para os níveis de ruído globais nesses recetores, é então possível propor as reduções de ruído necessárias para cada fonte, conforme necessário para cumprir os limites de ruído, de preferência com uma margem de segurança razoável, a fim de ter em conta as incertezas tanto das medições como dos cálculos.

Desta forma, o risco de futuras queixas / reclamações por parte dos vizinhos, ou de incumprimento dos limites legais, pode ser altamente reduzido. Além disso, o mapa de ruído e as informações associadas fornecidas com ele, podem tornar-se uma importante ferramenta de gestão de ruído para a equipa de Qualidade, Ambiente e Segurança da fábrica.

3. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE BEAMFORMING

A Câmara Acústica é uma ferramenta de medição que, de um modo geral, utiliza técnicas de *beamforming* de atraso-e-soma. Esta tecnologia calcula o cenário sonoro real num mapa sonoro visual, que consiste numa sobreposição de diferentes fontes sonoras. O princípio básico baseia-se no cálculo preciso dos atrasos temporais específicos das emissões sonoras que radiam de várias fontes para os microfones individuais de uma matriz [3]. A abordagem mais simples é o cálculo direto de uma função de atraso-e-soma no domínio do tempo, em que a função de tempo reconstruída em cada local x é calculada de acordo com [4]:

$$\hat{f}(x, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_i f_i(t - \Delta_i) \quad (1)$$

Onde t é o tempo, M é o número de microfones na matriz de sensores, e w_i são ponderações de sombreamento espacial. A Figura 1 ilustra este princípio com um exemplo simples usando duas fontes pontuais situadas em frente a um conjunto de microfones com 4 canais.

A função de *beamforming* de atraso-e-soma no domínio da frequência baseia-se num princípio semelhante ao da função no domínio do tempo. O diagrama de blocos na Figura 2 ilustra o mesmo exemplo simples, usando duas fontes pontuais.

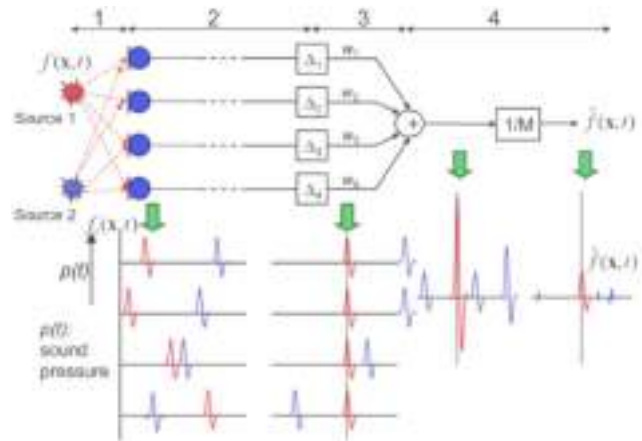


Figura 1. Princípio de *beamforming* no domínio do tempo [5].

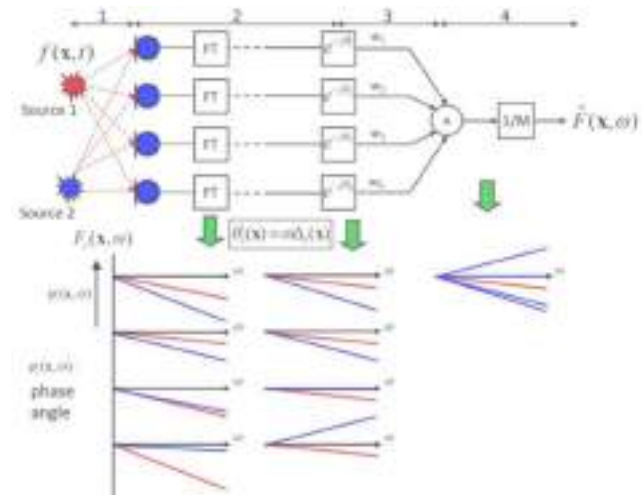


Figura 2. Princípio de *beamforming* no domínio da frequência [5].

4. CASO PRÁTICO DE ESTUDO

Trata-se de uma fábrica existente desde meados da década de 1950, abrangida pelo procedimento de licenciamento ambiental no âmbito do PCIP (Prevenção e Controlo Integrados da Poluição). A monitorização de ruído realizada regularmente para a renovação da licença ambiental, mostrou a existência de níveis sonoros significativos numa área residencial a oeste da fábrica, sendo as duas principais fontes de ruído: a própria fábrica e uma estrada nacional, situada entre a fábrica e a referida área residencial. Perante esta situação e considerando o conceito de corresponsabilidade definido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), verificou-se que a contribuição em termos de ruído proveniente de cada uma destas fontes era de cerca de 50%.

Para reduzir a corresponsabilidade da fábrica, a empresa decidiu desenvolver um mapa de ruído e um plano de ação. Para isso, foi criado um modelo acústico, que incluiu cerca de 200 fontes de ruído, cada uma das quais medida em campo

próximo, e o modelo foi validado por medições em 52 pontos de validação, dentro dos limites do perímetro industrial, e 5 pontos de validação perto de recetores sensíveis. A figura seguinte mostra um exemplo do trabalho de campo.



Figura 3. Exemplo de medição de campo próximo de duas chaminés ruidosas (esquerda) e pontos de validação próximos, na direção da área residencial.

A estrada nacional também foi incluída no modelo, como a principal fonte de ruído de fundo, para que a corresponsabilidade de ambas as fontes de ruído pudesse ser calculada. Uma vista 3D do mapa de ruído total (fábrica + estrada) para o indicador noturno Ln é mostrada na figura abaixo.

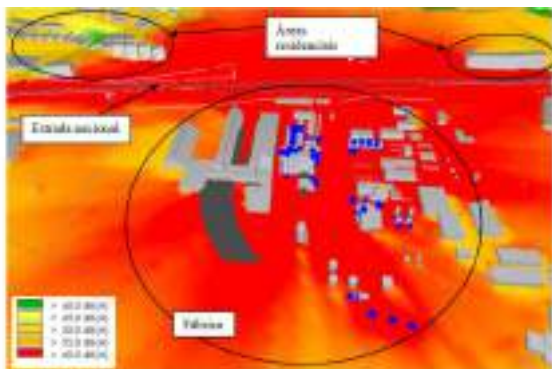


Figura 4. Vista 3D do mapa de ruído Ln, incluindo a fábrica e a estrada nacional.

O objetivo do plano de ação foi fixado em termos de Lden e Ln do ruído particular (RP) perto das zonas residenciais tal que: $L_{den}(RP) < 62 \text{ dB(A)}$; $L_n(RP) < 52 \text{ dB(A)}$. Note-se que os limites legais aplicáveis à área residencial, de acordo com o plano diretor municipal, são de 65/55 dB(A) respetivamente para Lden/Ln, o que significa que o objetivo definido corresponde ao ruído particular estar pelo menos 3 dB(A) abaixo dos limites regulamentares. Isto permite alguma margem para acomodar a contribuição do ruído residual, nomeadamente da estrada nacional, ou seja: uma quota de ruído de 50% para cada um (ruídos particular e residual).

O plano de ação foi dividido nas seguintes 3 fases:

1. Intervenção num grande condensador arrefecido a ar, a fonte de ruído com maior contribuição, consistindo na

substituição de ventiladores, redutores, motores e variadores de frequência.

2. Introdução de silenciadores em 5 chaminés no terraço de um dos edifícios de produção.
3. Intervenção ao nível de janelas e aberturas, nomeadamente nas fachadas de um edifício de Moagem.

Após a conclusão da fase 1, foram realizadas novas medições de ruído, quer na proximidade do condensador quer nos pontos de validação, para verificar os resultados obtidos, concluindo-se que estavam de acordo com o previsto pelo modelo: entre 10 e 12 dB(A) de redução de ruído na emissão do condensador refrigerado a ar e de 4 a 5 dB(A) de redução do ruído particular nas zonas residenciais, até 54 dB(A) para o Ln. No entanto, antes de passar para a fase 2, foi necessário realizar estudos de engenharia adicionais, incluindo cálculos de CFD (Computer Fluid Dynamics), para a otimização dos silenciadores – tal foi necessário porque havia limites para a altura máxima das chaminés, devido a um aeródromo próximo, e limites devido às entradas de ar das chaminés para monitorizar as emissões de gases.

Neste ponto, também foi decidido cruzar os resultados do modelo, recorrendo a testes de *beamforming* no caminho de propagação entre as chaminés e a área residencial mais exposta. Um primeiro teste foi realizado perto da área residencial, a cerca de 400 m de distância do edifício de produção com as chaminés ruidosas, a fim de confirmar que o condensador arrefecido a ar deixou de ser um problema e que a segunda fonte mais importante eram as chaminés, conforme previsto no modelo. A figura seguinte mostra a posição da câmara acústica e os principais resultados obtidos, para o ruído global em dB(A).



Figura 5. Testes de *beamforming*, a 400 m das fontes.

Note-se que para uma distância tão grande, a menos que não haja vento, é muito possível que ocorra alguma refração ao longo do caminho de propagação e que, portanto, o ângulo de chegada se desvie ligeiramente da direção da fonte. Embora isto seja geralmente desprezável para a direção horizontal, não é o caso para a direção vertical: a fonte aparente aparecerá mais alta do que a fonte real, caso haja propagação do vento descendente, e mais baixa, no caso da propagação do vento ascendente [6]. Como mostra a figura acima, foi encontrado um desvio vertical para baixo de cerca de 10 m entre o foco de ruído que aparece na imagem da câmara acústica e a posição das chaminés mais ruidosas. A análise dos dados de vento para o intervalo da medição mostrou que ocorreu uma ligeira condição de vento ascendente, de modo que um desvio de cerca de 1,4 graus na direção vertical de propagação do som, ao longo da trajetória de propagação de 400 m, é plausível, o que corresponde ao erro vertical de 10 m: $\arcsin(10/400) = 1,4^\circ$.

Uma pesquisa no espectro do sinal gravado revelou a origem de uma tonal na banda de 1/3 de oitava de 315 Hz: uma das 5 chaminés, instalada à esquerda e a uma altura inferior às duas mais barulhentas, como pode ser visto na figura abaixo, contabilizando o deslocamento vertical para baixo de cerca de 10 m. Note-se que esta chaminé era, de facto, a única fonte de ruído no edifício com uma tonal nesta banda de frequência, nas medições de campo próximo. O facto de ser detetado na câmara acústica a 400 m de distância é muito relevante, pois pode gerar uma penalização tonal de acordo com a regulamentação em vigor.



Figura 6. Identificação da origem de uma tonal aos 315 Hz.

Para confirmar os resultados, foi realizado um segundo teste de *beamforming*, onde a câmara acústica foi instalada mais perto das fontes, no telhado de um armazém próximo dentro da fábrica, a uma distância aproximada de 100 m das fontes, como mostra a figura 7.

Este segundo teste foi realizado num dia diferente, quase sem vento, e os resultados foram bastante claros, mostrando definitivamente a prevalência das chaminés ruidosas como as fontes de ruído com maior contribuição na direção dos recetores sensíveis, como exemplificado na figura 8.



Figura 7. Geometria do segundo teste de *beamforming*.



Figura 8. Ilustração dos testes realizados a 100 m das fontes de ruído em estudo.

Os resultados dos testes de *beamforming* foram cruciais neste projeto, para confirmar a necessidade de medidas de redução de ruído nas chaminés e para que a empresa decidisse avançar para a segunda fase do plano de ação de investimento. No final, a empresa decidiu alterar o processo de produção, desativando os sistemas de ventilação que incluíam as chaminés ruidosas – uma ação alternativa e ainda mais eficaz de controlo de ruído (eliminar as fontes de ruído!).

5. CONCLUSÕES

A aplicação de mapeamento de ruído combinado com técnicas de *beamforming* de câmaras acústicas, é uma

ferramenta muito poderosa para identificar, localizar e classificar fontes de ruído industrial. A sinergia e complementaridade entre as duas técnicas certamente contribuem para melhorar a precisão dos dados de ruído obtidos, que é a base para planos eficazes de redução de ruído para instalações industriais. A experiência dos autores e a de outros [7] mostra que, embora seja necessária uma grande quantidade de trabalho e tecnologia de ponta para produzir modelos acústicos industriais fiáveis, vale a pena o esforço, uma vez que ajuda definitivamente a alcançar os melhores resultados possíveis em programas de redução de ruído para um determinado investimento. O cruzamento dos resultados dos modelos de mapeamento de ruído com os obtidos a partir de ensaios de *beamforming*, representam uma importante mais-valia para a previsibilidade do resultado dos projetos de redução de ruído, reduzindo os riscos inerentes ao mesmo e associados à empresa.

6. REFERENCIAS

- [1] Probst, W. Modelling of Industrial Plants in the Framework of Sound Immission Plans. Proceedings of InterNoise 2000, Nice, France, 2000.
- [2] Santos, L.C.; Matias C.; Vieira, F.; Valado, F. Noise Mapping of Industrial Sources. Acústica 2008, October 20–22, 2008, Coimbra, Portugal, art. ID. 249.
- [3] Heilmann, G. Sound Source localization in 2D and 3D using Delay and Sum Beamforming. 1st International Congress on Acoustics, Buenos Aires, June 2008.
- [4] Heilmann, G.; Böck, M. Exploring the limitations and expectations of sound source localization and visualization techniques. InterNoise 2014. Melbourne, Australia, 2014.
- [5] Alloza, P.; Vonnheim, B. Noise source localization in industrial facilities. InterNoise 2019. Madrid, Spain, 2019.
- [6] Wilson, K.; Ostachev, V.; Voronovich, A.; Collier, S. Source Localization in the Atmosphere by Means of Beamforming and Tomography. InterNoise 2000. Nice, France, 2000.
- [7] Fiebig, W.; Dabrowski, D. Use of Acoustic Camera for Noise Sources Localization and Noise Reduction in the Industrial Plant. Archives of Acoustics. Vol. 45, No. 1, pp. 111–117 (2020).

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE BARRERAS VEGETALES

Maria Dolores Redel Macías¹

Carlos Castillo Rodríguez¹

Rafael Pérez Alcántara¹

Antonio José Cubero Atienza¹

¹Area de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ing. Rural, Constr. Civiles y Proyectos de Ingeniería. Universidad de Córdoba

RESUMEN

La acústica de la vegetación ha sido estudiada desde mediados del siglo XX, encontrándose una estimación de atenuaciones entre 2-6 dB por metro e incrementándose con la frecuencia. Posteriormente, se han llevado a cabo más estudios encontrándose variaciones en las atenuaciones.

En este estudio preliminar se han realizado mediciones de la atenuación acústica de setos convencionales con distintos espesores y especies y se ha medido tanto la atenuación en decibelios como la calidad acústica conseguida con los mismos. También se han caracterizado mediante cámara acústica las zonas de atenuación y se han correlacionado con la densidad y gramaje de la especie, entre otros factores.

ABSTRACT

The acoustic properties of vegetation have been studied since the mid-20th century, with estimated attenuations ranging from 2 to 6 dB per meter, increasing with frequency. Subsequently, more studies have been conducted, revealing variations in attenuations.

In this preliminary study, measurements of acoustic attenuation have been carried out on conventional hedges with different thicknesses and species, and both the attenuation in decibels and the acoustic quality achieved with them have been measured. The attenuation zones have also been characterized using an acoustic chamber and correlated with factors such as species density and gram weight, among others.

Palabras Clave— Atenuación acústica, barreras vegetales, calidad del sonido.

1. INTRODUCCIÓN

Que el ruido es uno de los contaminantes ambientales que más incide en la calidad de vida de una parte muy importante de la población es algo contrastado por multitud de estudios [1] y regulado por normativa de primer nivel [2]. La exposición crónica al ruido ambiental tiene impactos significativos en la salud y el bienestar físico y mental de la población afectada. Esta exposición a ruido es un problema generalizado en Europa con, al menos, un 20% de la población expuesta a niveles nocivos para la salud [1] [3]. A nivel andaluz, en el período desde 2010 a la actualidad ha descendido la percepción de la importancia con que ve este problema la población dentro de los problemas medioambientales gloGestion de la PRL en la UCOBales, pasando del primer lugar en 2010 (28,8%) al sexto lugar en 2022 (11.5%), ocupando los primeros lugares las basuras y residuos sólidos urbanos o la suciedad de las calles, lo cual es significativo [4]. El factor contaminante con mayor incidencia es el tráfico rodado, y los niveles que se alcanzan son especialmente significativos en vías de tránsito con alta velocidad de los vehículos, como son las autopistas [5].

Una solución natural con buena efectividad consiste en dotar de barreras vegetales las zonas afectadas, interponiendo dicha barrera entre la fuente de ruido y la zona receptora a la que queremos disminuir el nivel acústico que soporta. Este tipo de barreras son más estéticas y naturales que las barreras acústicas artificiales tradicionales, a la par que también son beneficiosas para el medio ambiente [6].

Este sistema de utilizar vegetación como medio para reducir el ruido comenzó a desarrollarse principalmente en la década de 1970. En esta década aumentaron los estudios científicos sobre las características sonoras de las plantas y cómo podrían influir en la propagación del sonido [7]. Al aumentar la urbanización, los problemas de la contaminación acústica se hicieron más patentes, lo que provocó un mayor interés en buscar una solución natural y sostenible.

Las barreras vegetales disminuyen el ruido mediante los mecanismos de absorción, dispersión y difracción de las ondas acústicas. La vegetación desempeña un rol de filtro acústico natural al absorber parte del sonido y redirigir y dispersar las ondas sonoras restantes [8]. Las plantas están formadas por hojas, tallos y ramas, y esta distribución desempeña un papel crucial en la cantidad de absorción y dispersión que provoca. Es evidente que las barreras vegetales densas y diversificadas tienden a ser más eficaces en la atenuación del ruido, ya que ofrecen múltiples capas que deben atravesar las ondas sonoras. La interacción entre las ondas sonoras y la vegetación se puede producir de forma directa por redistribución y la absorción de la energía sonora. La redistribución de las ondas sonoras se presenta en tres formas distintas: reflexión, difracción y difusión. La absorción en cambio se debe fundamentalmente a efectos termodinámicos y la onda sonora pierde energía precisamente por una transferencia de calor.

A lo largo de los años la investigación ha progresado en la comprensión de cómo los distintos tipos de vegetación afectan en la reducción del ruido. Se han llevado a cabo estudios con la finalidad de identificar la configuración ideal de las barreras vegetales, abarcando la selección de especies de plantas, su densidad, altura y disposición [9]. Por otra parte, la tecnología de modelado acústico ha experimentado un gran avance, pudiéndose predecir con mayor precisión los resultados derivados de la implantación de barreras vegetales en distintos contextos.

En resumen, las barreras vegetales se han consolidado como una solución eficaz y sostenible para la atenuación del ruido en una variedad de entornos. Los progresos en la investigación y la tecnología siguen perfeccionando nuestra comprensión sobre cómo optimizar plenamente las propiedades acústicas de la vegetación [10].

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es estudiar la influencia de barreras acústicas vegetales de la especie “tuya” en la atenuación del ruido y en la modificación de parámetros de calidad acústica, como loudness, sharpness o roughness, en función de las características del propio seto, y de su espesor, utilizando para ello sonidos normalizados (ruido blanco) en condiciones controladas de laboratorio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en una cámara semianecoica, en la cual se instaló un túnel forrado internamente con acondicionamiento acústico con el material INAPICEL© con un coeficiente absorción óptimo (cercano a la unidad) sobre todo por encima de la banda de 500Hz. Ello permitía minimizar las reflexiones internas, y garantizar que el ruido

emitido por la fuente sonora alcanzaba la barrera vegetal de forma óptima.

En un extremo del túnel se instaló la fuente sonora (altavoz conectado al sistema de generación de ruido blanco), estando a la salida del túnel, por el otro extremo, la barrera vegetal.

El proceso consistía en situar a la salida del túnel una barrera vegetal de la especie que se fuera a ensayar, con un espesor determinado, y el sistema de micrófonos de medida, array de micrófonos y sonómetro para registrar los datos.

Posteriormente, se situaba una segunda barrera de la misma especie, doblando aproximadamente el espesor inicial, realizando nuevamente la tanda de mediciones. Y finalmente un tercer nivel de la barrera vegetal, repitiéndose las medidas, de manera que todas las conclusiones se podrían extraer para los tres niveles de espesor de barrera instalados.

Para poder hacer una caracterización completa se han tomado datos característicos morfológicos de la especie estudiada. Estas características morfológicas abarcan desde la anchura del seto, la biomasa y la transparencia. Para hallarla la transparencia de las especies vegetales se usará el programa ImageJ [11].

La especie empleada para las medidas fue *tuya*. Su nombre científico es *Platyclusus orientalis*. La tuya pertenece a la clase Pinopsida, es del orden de los Cupressales, forma parte de la familia Cupressaceae y es del género Thuja. Por las condiciones ambientales que soporta, puede aguantar heladas de hasta -18°C y temperaturas elevadas hasta los 40°C , y que precisa estar situada al exterior en áreas a pleno sol, la hacen ideal para ser plantada en Andalucía.

Las medidas se llevaron a cabo utilizando un array de micrófonos tipo MEM de la marca GFai, modelo Mikado, dotado de cámara acústica, junto con el software NoiseImage para el análisis de las medidas. Ello permitía no solo tener los datos de la atenuación producida por la barrera vegetal a diferentes niveles de profundidad, sino también identificar el holograma de transmisión, con los puntos de mayor y menor transmisión.

Para la evaluación de la calidad del sonido se emplearon tres métricas: loudness, sharpness y roughness. El loudness es un término que se refiere a la percepción humana de como de fuerte suena un sonido. La definición de loudness establece que 1 Sone, la unidad de loudness, corresponde a un tono de 1 kHz a 40 dB. El sharpness es una sensación auditiva relacionada con el contenido de altas frecuencias e independiente del nivel sonoro. Su unidad es el Acum. El roughness es una sensación auditiva relacionada con modulaciones de volumen en frecuencias demasiado altas

para discernirlas por separado, como frecuencias de modulación superiores a 30 Hz. Su unidad es el Asper.

4.. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar los resultados obtenidos en las medidas, se pueden observar en términos de loudness, sharpness o roughness (entre otros) la reducción de sonido respecto a un, dos o tres setos. La Figura 1 muestra los resultados de loudness. Se ha encontrado una reducción de un seto (Figura 2a) a tres setos próxima a 1 sone. Considerando que la JND (Just noticeable difference) es de 0.5 sone, la reducción obtenida con una sección de tuya inferior a 1 m, por lo que sería apreciable la reducción producida.

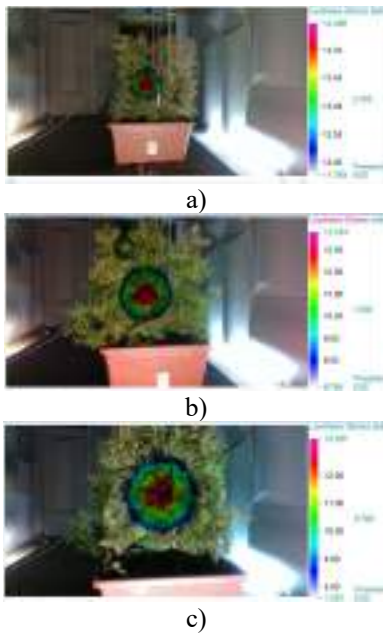


Figura 1. Loudness para: a) un seto; b) dos setos y c) tres setos.

Respecto al sharpness, aunque no se ha observado una reducción significativa; sin embargo, sí se ha reducido el área donde se produce mayor reflexión de sonido (Figura 2). En el caso del roughness, no solo se reduce el área donde se produce la reflexión del sonido, sino que además se reduce desde aproximadamente 29 asper, a 23 asper cuando se aumenta el grosor de la barrera vegetal con 3 setos (Figura 3).

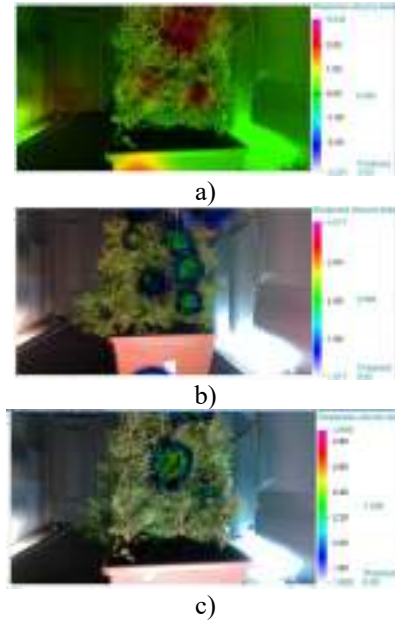


Figura 2. Sharpness para: a) un seto; b) dos setos y c) tres setos.

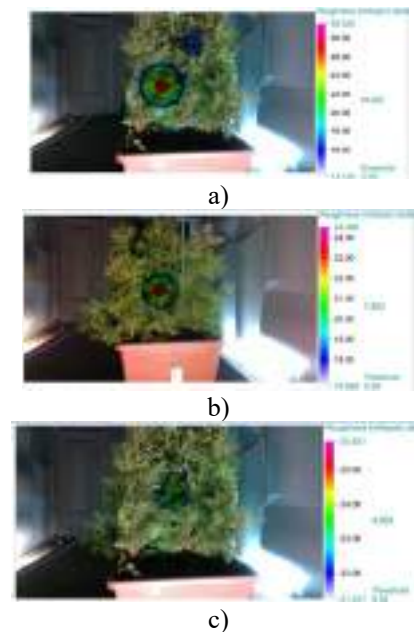


Figura 3. Roughness para: a) un seto; b) dos setos y c) tres setos.

De acuerdo con otras investigaciones [12], se llega a la conclusión de que, dependiendo de las características morfológicas, se tendrá una mayor o menor absorción de ruido y, por lo tanto, una menor o mayor reflexión de sonido. La Tabla 1 muestra las características morfológicas de la tuya.

Tabla 1. Características morfológicas de la tuya.

Anchura (cm)	Biomasa (g)	Biomasa hoja (g)	Superficie foliar (cm ²)
27.33	1641.41	1372.35	25590.09
Biomasa tronco (g)	Transparencia (%)	Opacidad (%)	Superficie foliar unitaria (cm ²)
269.06	4.60	95.40	6.34

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por [13] quienes llegaron a la conclusión de que las hojas y tallos tendían a reducir los niveles de sonido de mayores frecuencias. El sharpness se ha visto reducido, lo que significa que las altas frecuencias se han reducido también. La transparencia obtenida es muy baja, cuanto menor sea la transparencia, mayor será el nivel de atenuación del sonido. Aylor [7] afirmó que las hojas anchas consiguen atenuar el sonido en mayor medida que las estrechas, es decir, que cuanto mayor sea la superficie foliar, mayor será la atenuación, pero que esta atenuación no resulta ser directamente proporcional a la cantidad de follaje [7]. [14] Zhu y Jiani llegaron a la conclusión de que la capacidad de reducir el ruido de las plantas con hojas largas y estrechas, las cuales tienen una menor área para reflejar o absorber ondas, es menor que las de las plantas con hojas ovaladas o elípticas. Aunque la tuya no tiene una hoja redonda y ancha; sin embargo, debido al grosor de las hojas y a la gran opacidad, se obtienen resultados aceptables de atenuación y mejora de la calidad del sonido (Figura 5).

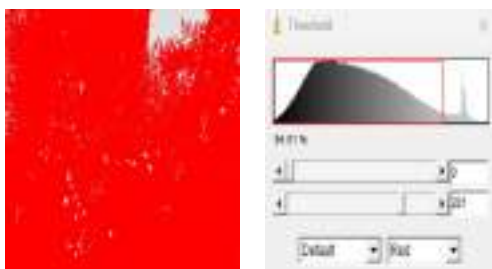


Figura 5. Resultados de transparencia de la tuya.

La difusión sonora es un fenómeno que se presenta cuando una onda sonora choca con un obstáculo, ocasionando una pérdida de energía. A su vez, las ondas sonoras que ya han perdido su energía buscan retransmitirse, ya sea a través de una abertura dentro del mismo obstáculo, o rodeando dicho obstáculo (difracción). Algunos autores han estudiado los coeficientes de difusión de diversas especies para correlacionar con la capacidad de atenuación acústica que tienen las especies. Yendle y Prashant [15] estudiaron más de

61 especies de árboles en Reino Unido y el efecto en la reducción de la contaminación ambiental. La tuya es una especie que presenta una alta densidad y es eficaz en la reducción, por ejemplo, del polen. En otros estudios [16] se ha estudiado los coeficientes de difusión por frecuencias, los resultados obtenidos en función de la densidad mejoran la absorción acústica de las especies.

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio sobre el efecto de la interposición de un seto de la especie “tuya” en la transmisión de un sonido en condiciones controladas de laboratorio.

Se ha encontrado que la reducción de los parámetros de calidad acústica loudness, y roughness es significativa, si bien estos resultados deben considerarse como preliminares y deben ser ratificados por un mayor número de ensayos con variación de características del seto.

En el caso del parámetro sharpness, si bien la reducción no es significativa, sí se reduce el área con mayor reflexión del sonido.

Estos resultados permiten concluir en una primera aproximación que un uso adecuado de setos de tuyas debidamente seleccionados en espesor, densidad y opacidad del seto, pueden conseguir modificaciones significativas en el sonido, lo cual puede repercutir en una mejora de las condiciones acústicas de los espacios protegidos por el seto, y una mejor calidad de vida al ser barreras naturales que no alteran artificialmente el entorno si la implantación es adecuada.

6. REFERENCIAS

- [1] EEA. European Environment Agency Report 22/2019 “Environmental Noise in Europe 2020”. ISSN 1977-8449. ISBN 978-92-9480-209-5.
- [2] DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental
- [3] WHO. Environmental noise guidelines for the European region. 2018. Regional Office for Europe, Copenhagen (<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>).
- [4] Ecobarómetro de Andalucía 2022. Secretaría General de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul. 2022.
- [5] Álvarez, I. A., Martínez, J. M., Pérez, L. D., Figueroa, F. A., de Armas Mestre, J., & Llop, M. L. R. . Contaminación ambiental por ruido. Revista Médica Electrónica, 39(3), 640-649. 2017.

[6] Nilsson, M., Bengtsson, J., Kjaerboe, R. . Environmental Methods for Transport Noise Reduction. “Book”. CRC Press. Taylor and Francis Group. 2019.

[7] Aylor, D. Noise Reduction by Vegetation and Ground. “The Journal of the Acoustical Society of America”. Vol. 51. Pp. 197-205. 1972.

[8] López Jiménez, N. . Propuesta para el control de ruido ambiental en función de frecuencias de emisión mediante barreras vegetales. [Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México]. 2018.

[9] Horoshenkov, K., Khan, A., Benkreira, H. . Acoustic Properties of Low Growing Plants. “The Journal of the Acoustical Society of America”. Vol. 133. Pp. 2554-2565. 2013.

[10] Basseda Peradalta, J. . Estudi de les pantalles acústiques vegetals de gran alçada. [Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. 2015.

[11] Ferreira, T.; Rasband, W. ImageJ User Guide IJ1. 46r. <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide>. 2012.

[12] Unión Europea. . Novel solutions for quieter and greener cities. Proyecto Hossana. 2013.

[13] Biocca, M., Gallo, P., Di Loreto, G., Imperi, G., Pochi, D., Fornaciari, L. . Noise attenuation provided by edges. “Journal of Agricultural Engineering”. Volumen L:889, pp. 113-119. 2019.

[14] Yang, F. et al. The Investigation of Noise Attenuation by Plants and the Corresponding Noise-Reducing Spectrum. “Journal of Environmental Health”. Vol. 72. N° 8. Pp. 8-15. 2010.

[15] Barwise, Y].; Kumar, P. Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection. “Climate and Atmospheric Science”. Article number 12. 2020.

[16] (Yang et al. Acoustic Effects of Green Roof Systems on a Low-Profiled Structure at Street Level. “Building and Environment”. Vol. 50. Pp. 44-55. 2012

ESTUDIO ACÚSTICO POR CAMBIO DE USO DE SUELO EN DOS MUNICIPIOS DE CANTABRIA

*Gonzalo Vidal Moltó; Jose Luis Cueto Ancela
Isabel Giménez Anaya; Fernando López Santos*

Laboratorio de ingeniería Acústica, Universidad de Cádiz, Cádiz, España; Edificio CASEM; Campus de Puerto Real; Avda. de la Universidad de Cádiz s/n; 11515 Puerto Real. Teléfono: 956 019 108

SINCOSUR Ingeniería Sostenible S.L. Avda. San Francisco Javier, 9, 5º-27, Sevilla, España
Teléfono: 954 510 031

RESUMEN

El objetivo principal del proyecto es evaluar los niveles de inmisión y emisión del ruido en un cambio de uso de suelo a industrial. Para ello nos hemos basado en la directiva Europea 2002/49/CE y el Real Decreto 1367/2007 aplicado el método de modelado acústico CNOSSOS-EU. Además, se ha consultado la normativa de la Comunidad en materia de ruido así como las ordenanzas municipales de ambos municipios.

Dado que el cambio de uso afectará a los objetivos de calidad acústica se define el procedimiento a aplicar. Para ello se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

Recopilación y procesado de toda la información geográfica necesaria, realización del mapa de ruido con todas las fuentes ya existentes como son los ejes viarios y ferroviarios, la incorporación de la industria a los emisores ya presentes y la realización de los cálculos necesarios.

Con los datos obtenidos se llevará a cabo un análisis pormenorizado del impacto del cambio de uso propuesto. En este sentido se obtendrá el número de personas expuestas y se llevará a cabo una propuesta de medidas correctoras en el caso de que fuesen necesarias.

ABSTRACT

The main objective of the project is to assess the levels of immission and noise emission in a change from land use to industrial. For this we have based on the European directive 2002/49/CE and the Royal Decree 1367/2007 applied the method of acoustic modeling CNOSSOS - EU. In addition, Community noise legislation and the municipal ordinances of both municipalities have been consulted.

Since the change of use will affect the acoustic quality objectives, the procedure to be applied is defined. The following aspects have been taken into account:

Autor de contacto: gonzalovm2512@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Collection and processing of all the necessary geographical information, construction of the noise map with all the existing sources such as road and rail axes, the incorporation of the industry to the emitters already and performing the necessary calculations.

With the data obtained, a detailed analysis of the impact of the proposed change of use will be carried out. In this respect, the number of persons exposed shall be obtained and a proposal for corrective measures shall be made if necessary.

Palabras Clave — Acústica ambiental, mapas de ruido, geoprocésamiento, población expuesta.

1. OBJETIVOS

Los objetivos del presente proyecto se desglosarán en 3 fases.

La fase pre-operacional consistirá en la modelización previa de la zona de estudio y recopilación de la información para realizar un diagnóstico del área en el estado actual. Para ello, se ha establecido un radio de cobertura de 1,5 km desde el perímetro del parque industrial.

Posteriormente, en la fase pos-operacional se evaluarán 4 casos de estudio para analizar las distintas soluciones.

1) Emisión con los emisores ya presentes.

2) Inmisión en el sector industrial.

3) Emisión del parque industrial por separado.

4) Emisión futura de todos los elementos.

5) Evaluación de la población expuesta en los edificios residenciales ya sea por la influencia de los emisores presentes, de solo el sector industrial o de todos los emisores juntos.

Por último, se planteará una fase de discusión en cuanto a los resultados obtenidos.

2. INTRODUCCIÓN

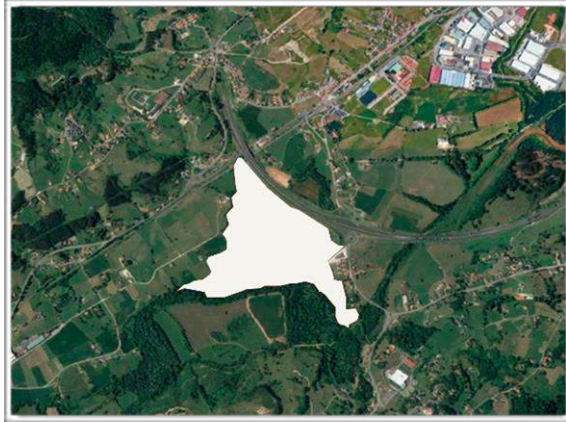


Figura 1. Ubicación del sector industrial en la zona de estudio.

El área de estudio corresponde a un nuevo sector industrial que se va a ubicar en Cantabria.

Tras revisar la zonificación acústica de la zona, se ha podido comprobar que no hay ningún espacio protegido categorizado con el tipo g) por lo que se podría ubicar el parque industrial.

Para la realización de este proyecto, se ha aplicado la siguiente normativa:

- Directiva 2002/49/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

- Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad (OCA) y emisiones acústicas [1].

- En cuanto a la normativa autonómica de la provincia de Cantabria, y local de los municipios de Piélagos y Villaescusa no hay definida una ley propia de ruido, por lo que nos ceñiremos a la normativa estatal [2] [3].

3. PROCESADO DE DATOS EN QGIS Y CADNAA

En cuanto al procesado geográfico de datos en la fase pre-operacional se ha seguido la metodología común CNOSSOS-EU y CNOSSOS-ADIF para el eje ferroviario [4] [5].

Este método, fue elaborado en el año 2008 por la comisión Europea y es de obligado cumplimiento tanto para cartografiado estratégico de ruido como evaluación de impacto ambiental.

La información que se importará para ser procesada será la siguiente:

3.1. Curvas de nivel

La información en cuanto a las curvas de nivel ha sido extraída del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y datada del año 2019 [6].

Dichas curvas, han sido simplificadas a una precisión de 1 metro y han sido revisadas y modeladas la altura y la ubicación de elementos como puentes o túneles.

3.2. Ejes viarios

En cuanto a los ejes viarios, la información de la que se dispone es del año 2017 en adelante y también ha sido extraída del CNIG.

Tras analizar la zona de estudio, se ubica un total de 5 carreteras las cuales:

De competencia del ministerio se ubican 2 (S-30 y N-623) [7].

De competencia autonómica existen 3 (CA-144, CA-143, CA-142) [8].

Los parámetros que han sido importados y modelados en Qgis son la Intensidad Media Diaria y Horaria (IMD y IMH), % de vehículos pesados, la pendiente de la vía, la velocidad y el tráfico en las rotondas.

En CadnaA, simplemente habrá que importar correctamente los parámetros como carreteras, establecer la altura una vez introducido el Modelo Digital del Terreno (MDT) y revisar elementos como puentes o túneles.

3.3. Ejes ferroviarios

Respecto al eje ferroviario, el cual posee una longitud de 4 km, la información ha sido extraída del CNIG y data del año 2023. Dado que la infraestructura es propiedad de ADIF, se dispone también de información proporcionada por ellos en cuanto al flujo de ferrocarriles, tipología entre otros parámetros.

En cuanto al tratamiento de datos, primeramente se ha tramificado la vía por velocidad. Seguidamente se ha obtenido el número de trenes que circula por periodo, la tipología de tren y subtipo [9]. Por último, se requiere del número de locomotoras y vagones promedio.

A la hora de la importación en CadnaA, habrá que importar los parámetros como ferrocarril, establecer la altura del eje y elaborar una librería de los ferrocarriles la cual en función de todos los parámetros procesados con anterioridad, se obtiene un nivel de potencia equivalente (L_w, eq').

Tabla 1. Valor de nivel de potencia total emitida por el eje ferroviario.

Nivel de potencia equivalente (L_w, eq')	
Día (dBA)	Noche (dBA)
82,9	81,1

3.4. Edificaciones

En este caso, se ha extraído de la Sede del Catastro la información dado que se necesita información explícita de la altura y es del año 2023 [10]. Los parámetros que se necesitarán procesar serán:

- Tipología de edificio.
- N° de viviendas y altura de los edificios.
- Asignación de la población a los edificios residenciales.

En total, se tiene 777 edificios residenciales los cuales tienen asignada su población en función de su altura y número de plantas, además de haber 5 edificaciones de uso educativo y 1 de uso sanitario.

3.5. Sector industrial

Toda la información del nuevo parque industrial que se quiere construir ha sido proporcionada por el cliente entre las que se destaca un conjunto de planos, cartografía y datos del nuevo tráfico viario.

Se sabe también, que las fuentes emisoras industriales tendrán una actividad de tipo productivo, almacenamiento y logística, además de funcionar las 24 horas del día. El personal que trabaja en el área, únicamente operará en la zona blanca que ubicada al sur del parque industrial por el día y que en el resto del sector no habrá personal operativo.



Figura 2. Definición de la parcela del sector industrial.

En cuanto al tratamiento de datos en el software geográfico y de cálculo, se analizarán:

- Caracterización de las fuentes industriales, ya que CadnaA permite la incorporación de fuente lineal, vertical u horizontal.
- Espectro de potencia. Para ello, se ha buscado información en una fase de datos denominada Source dB la cual contiene espectros de nivel de potencia para un gran número de fuentes industriales [11].
- Nuevo tráfico del eje viario del sector industrial. Esto tendrá como consecuencia un aumento en la rotonda de acceso a la industria.

- Altura de las áreas emisoras, la cual será de 2 m.
- Tipología de fuente. Dado que no se proporciona ningún valor respecto a las fuentes, se ha optado por establecer 4 fuentes emisoras superficiales las cuales vendrían ilustradas en la Figura 2 en color azul.
- Potencia de las fuentes emisoras.

Tabla 2. Datos de potencia acústica de las fuentes industriales.

Frecuencia (Hz)								
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nivel de potencia Lw (dB)								
22,2	33,2	44,2	49,3	54,2	56,2	52,2	47,2	38,2

3.6. Absorción y condiciones meteorológicas



Figura 3. Áreas de absorción establecidas.

Respecto a la absorción, se han establecido áreas de absorción de valor $G = 0$, mientras que el modelo general tendrá un valor de $G = 1$. Esto es debido a que el área en donde se ubicará la industria está compuesta casi en su totalidad por vegetación, lo que se traduce en una zona totalmente absorbente [12].

En cuanto a las condiciones meteorológicas, el modelo de cálculo solicita una temperatura y humedad promedio anual las cuales en los municipios donde se ubica la zona de estudio sería:

Tabla 3. Temperatura y humedad promedio anual de Santander.

Temperatura promedio anual (°C)	Humedad promedio anual (%)
15,9	77

4. RESULTADOS

Una vez realizado el procesado de datos y el cálculo acústico, se procederá a analizar la fase pos-operacional la cual se dividirá en 5 casos de estudio.

4.1. Emisión de todos los elementos actuales

En el primer caso a estudio, se descubre que la autovía S-30 llega a producir 82 dBA a 1 metro en el periodo día y 77 dBA en el periodo de noche siendo el eje viario con más emisión.

Por otro lado, el eje ferroviario, llega a alcanzar en solitario una emisión de 66 dBA 1 metro en el periodo diurno y 63 dBA en el nocturno.

Se concluye por tanto, que ya existe superación de los OCA con los emisores ya presentes.

4.2. Inmisión en el parque industrial



Figura 4. Inmisión en el sector industrial. Periodo diurno.



Figura 5. Inmisión en el sector industrial. Periodo nocturno.

En cuanto a la inmisión en el nuevo sector industrial de los emisores ya presentes, se ha establecido un cinturón de 14 de receptores en todo el perímetro de la parcela a una altura de 2 metros para su análisis.

Tras esto, se ha podido comprobar lo que se ilustraba en el caso anterior ya que en los receptores más próximos a la

carretera S-30 y el eje ferroviario se producen superación de los límites acústicos establecidos.

Sin embargo, en esas áreas de superación es donde van a estar ubicadas las fuentes emisoras industriales, por lo que al no haber personal afectado en esa zona no se aplicarán medidas correctoras.

4.3. Emisión de solo el sector industrial

Este caso de estudio ha sido elaborado con el fin de poder comprobar el aporte acústico del sector industrial al resto de emisores ya presentes.

Se ha podido confirmar, que el aporte de la industria al resto de fuentes acústicas es mínimo en comparación con la emisión ya existente.

4.4. Emisión futura de todos los elementos



Figura 6. Evaluación de los edificios residenciales sin la emisión del sector industrial.



Figura 7. Evaluación de los edificios residenciales con el sector industrial funcionando.

En este caso, se evaluarán las edificaciones más próximas al sector industrial para poder analizar si de verdad la nueva construcción aporta más emisión.

Por una parte tenemos la figura 1 en la cual se aprecia la emisión de los emisores ya presentes y la figura 2 la cual contiene también la emisión del parque industrial. Se puede apreciar, que como máximo se produce un aumento de 1 dBA en las edificaciones encuadradas en color rojo por la adición del sector industrial.

4.5. Cálculo de población expuesta

Para poder realizar el cálculo de población expuesta, una vez ya se tiene asignada la población a cada edificio residencial se ha seguido el procedimiento citado en la guía CNOSSOS-EU.

Como no se dispone de la ubicación precisa de las viviendas, se deberá realizar por una parte el valor de la mediana de los niveles de evaluación para los 3 periodos del día de cada edificio y posteriormente, del valor obtenido, a todos los receptores que superen dicho valor se les asignará población. A continuación, se mostrará la agrupación de los edificios por recuadros y el número de personas expuestas en cada uno de ellos para los 3 periodos del día:

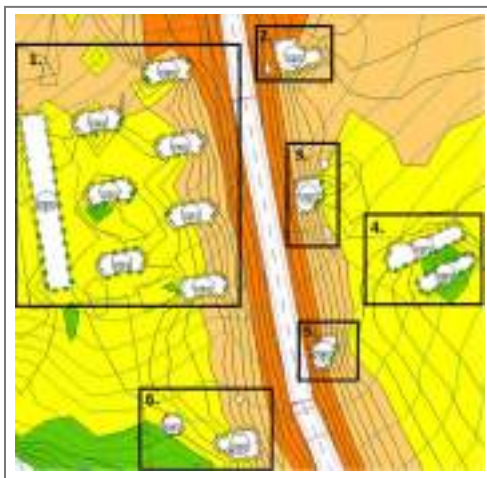


Figura 8. Edificios con superación de los OCA. Imagen correspondiente al Ld.

Tabla 4. Población expuesta en los 3 primeros recuadros, para los 3 periodos del día.

Personas afectadas por periodo.	1.	2.	3.
Día	3/67	2/5	0/5
Tarde	3/67	2/5	0/5
Noche	25/67	5/5	5/5

Tabla 5. Población expuesta en los 3 últimos recuadros, para los 3 periodos del día.

Personas afectadas por periodo.	4.	5.	6.
Día	-	4/5	0/4
Tarde	-	4/5	0/4
Noche	-	5/5	1/4

Tabla 6. Población total expuesta para los 3 periodos del día.

Población total afectada	Día	Tarde	Noche
	9/86	9/86	41/86

5. DISCUSIÓN

En el periodo diurno, que es cuando en el sector industrial habría personal dentro trabajando no hay superación de los límites para nuevas infraestructuras por lo que estaría dentro de la normativa.

Por otro lado, en la noche en los receptores más próximos la autovía se produce superaciones de los valores máximos de inmisión. Al no ubicarse ningún trabajador ahí, no se produce afección por superación de los OCA.

En los edificios más próximos al nuevo sector industrial, se aprecia que este solo aporta 1 dBA más en fachada a un conjunto determinado de edificios.

6. CONCLUSIÓN

La emisión acústica producida por los emisores ya presentes no supera los Objetivos de Calidad Acústica aplicables para nuevas áreas urbanizadas tipo b).

A la hora de evaluar los edificios residenciales se observa que los emisores presentes en el área de estudio ya generan una superación de los OCA en 6 viviendas residenciales en el periodo nocturno y 3 viviendas en todos los periodos de referencia.

El sector industrial como mucho aporta 1 dBA de más a las edificaciones que están próximas a dicho sector y que este aporte de emisión únicamente consigue que una vivienda residencial supere los OCA en el periodo nocturno.

Por último, se concluye que los problemas de contaminación acústica que pueda haber en las edificaciones residenciales no va a ser incrementados por el nuevo sector industrial a construir, si no que habría que buscar soluciones en el resto de emisores acústicos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Boletín Oficial del Estado (BOE). *Real Decreto 1367/2007*, 2007.
- [2] Ayuntamiento de Villaescusa. *Aprobación definitiva del Plan Parcial del Sector SAU-IF de las Normas Subsidiarias de Planeamiento*, 2017.
- [3] Ayuntamiento de Piélagos. *Ordenanza municipal sobre protección de convivencia ciudadana y prevención de actuaciones antisociales*, 2012.
- [4] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. *Guía básica de recomendaciones para la aplicación de los métodos comunes de evaluación del ruido en Europa (CNOSSOS – EU)*, 2021.
- [5] ADIF. *Metodología para estudios acústicos*, 2022.
- [6] Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana. *Centro Nacional de Información Geográfica*, 2019.
- [7] Ministerio de Fomento. *Mapa de tráfico de las carreteras provinciales (Madrid, España)*, 2017.
- [8] Dirección General de obras públicas de Cantabria. *Plan de aforos de la red autonómica de carreteras de Cantabria (Cantabria, España)*, 2017.
- [9] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Renfe. *Flota de trenes*, 2020.
- [10] Gobierno de España. *Sede del Catastro (Madrid, España)*, 2022.
- [11] DGMR, and J. White. *IMAGINE - Improved methods for the assessment of the generic impact of noise in the environment*, 2007.
- [12] DataKustik. *CadnaA – Reference Manual*, 2018.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AAM-1 Experiencias sobre CNOSSOS y MER de 4 ronda.

NOVEDADES METODOLÓGICAS EN EL DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LA INFORMACIÓN APORTADA POR LAS AUTORIDADES COMPETENTES (AACC), ASOCIADA A LOS MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO DE LA CUARTA FASE DE RUIDO

Ramón Querol Herrá^{1}*

¹Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España

RESUMEN

Con la entrada en vigor del nuevo modelo de datos de ruido aprobado por la Decisión de Ejecución (UE) 2021/1967, la Cuarta Fase de aplicación de la Directiva de Ruido implica por parte de los estados miembros, cambios en el reporte de datos a la Comisión Europea, tanto en los mapas estratégicos de ruido (MER) como en los planes de acción (PAR).

Los nuevos conjuntos de datos, que han supuesto un evidente esfuerzo por parte de las autoridades competentes (AACC), empresas y profesionales del sector del ruido ambiental, permiten ampliar la información ambiental disponible cumpliendo con la Directiva INSPIRE y las obligaciones de transparencia e información al público.

El Reino de España ha adaptado los nuevos conjuntos de datos a la normativa interna y estructura de las infraestructuras de datos nacionales, en particular la IDE-MITECO.

Tras un número representativo de MER recibidos y revisados, el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) tiene una visión global de los aspectos técnicos determinantes a tener en cuenta con el objeto de facilitar la realización de las entregas por las distintas AACC, detalles que se expondrán en la comunicación.

Palabras Clave—

Cuarta fase, mapa estratégico de ruido, planes de acción

ABSTRACT

With the entry into force of the new noise data model approved by Implementing Decision (EU) 2021/1967, the Fourth Phase of application of the Noise Directive implies, on the part of the member states, changes in the reporting of data to the European Commission, both in the strategic noise maps (MER) and in the action plans (PAR).

The new data sets, which have involved an evident effort on the part of the competent authorities (AACC), companies and professionals in the environmental noise sector, make it possible to expand the available environmental information in compliance with the INSPIRE Directive and the obligations of transparency and information to the public.

The Kingdom of Spain has adapted the new data sets to the internal regulations and structure of the national data infrastructures, in particular the IDE-MITECO.

After a representative number of MER received and reviewed, the CEDEX (Center for Studies and Experimentation of Public Works) has a global vision of the determining technical aspects to be taken into account in order to facilitate deliveries by the different CAs, details that will be set out in the communication.

Keywords—

Fourth phase, strategic noise map, action plans

* *Autor de contacto:* ramon.querol@cedex.es

Copyright: ©2023 Ramón Querol Herrá. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2021 se publica la Decisión de Ejecución (UE) 2021/1967 de la Comisión de 11 de noviembre de 2021 por la que se crea un archivo de datos obligatorio y un mecanismo obligatorio de intercambio de información digital de conformidad con la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

Esta decisión supone un cambio en los modelos de datos en la Cuarta Fase de aplicación de la Directiva de Ruido Ambiental (END), cuyas fechas de referencia son los años 2022 y 2024 para el reporte de los Mapas Estratégicos de Ruido (MER) y los Planes de Acción (PAR), respectivamente.

El nuevo modelo de datos debe cumplir simultáneamente las Directivas de Ruido y las de INSPIRE, por lo que implica una novedad con respecto a la forma en que se presentaban los datos en fases anteriores.

Además, este modelo de datos debe cumplir con el Sistema Nacional de Información sobre Contaminación Acústica (SICA), creado de acuerdo a la Ley del Ruido, que ofrece información al público sobre los estudios que realizan las autoridades ambientales, relativos al cartografiado estratégico.

Por último, el modelo de datos también debe cumplir con la Ley LISIGE, relativa a las obligaciones en cuanto a las infraestructuras y los servicios de información geográfica, que es el fundamento de la nueva Infraestructura de Datos Espaciales de SICA (IDESICA).

Por todo lo expuesto, con el fin de suministrar datos para alimentar estos sistemas, es necesario que las Autoridades Competentes (AACC) en la elaboración y aprobación de los Mapas Estratégicos de Ruido, aporten la información resultante de los mismos de acuerdo a los criterios que se recogen en las instrucciones [1]-[3] que elabora el CEDEX², como soporte técnico del MITECO, el cual es el punto focal español en esta materia, y el responsable del SICA.

Desde la experiencia en el CEDEX en la revisión y reporte los MER que han ido elaborando las AACC en esta Cuarta Fase, en la presente comunicación se exponen algunos aspectos importantes, que se considera que están generando más dificultades en la entrega de datos.

2. CONSIDERACIÓN INICIAL

Los modelos de datos de la Cuarta Fase están diseñados para mantener una trazabilidad biunívoca entre los datos entregados en la Declaración de Fuentes (DF1_5) y los que se envían en los MER (DF4_8) y PAR (DF7_10). Dado que los flujos de datos tienen una secuencia temporal establecida en END, en caso de que los flujos posteriores varíen las previsiones de los anteriores, estos deberán ser revisados.

El sistema aceptado para el cartografiado estratégico de ruido es el EPSG:3035 Lambert Azimuthal Equal Area (ETRS89-LAEA): Sistema de referencia ETRS89 extendido para Europa.

Todos los templates GPK para cumplimentar están a disposición en la Web de SICA.

2. ENTREGABLES DEL MER 4ª FASE

2.1. Información para publicación en SICA

Esta información responde a las obligaciones de Información al Público derivadas del Artículo 5 de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, y permitirá el acceso del público general a la información derivada de la elaboración de los MER.

Los archivos a entregar serán:

- Archivo de alimentación del gestor SICA (SHP)
- Memoria Resumen (PDF)
- Planos (PDF)

Para alimentar SICA se requiere de un archivo SHP de importación masiva de datos que permite obtener la información de la ubicación y nombre de los archivos PDF.

Este archivo SHP relaciona cada Estudio y UME con los archivos que deben ser mostrados en SICA, por tanto es fundamental que la denominación de planos y memoria sea exacta, y que exista correlación con lo entregado en el DF1_5 (por ejemplo en los campos “Codigo_UME” y “nomb_fuent”). En caso de la más mínima discrepancia en las denominaciones, por ejemplo debido a guiones o espacios en blanco, la importación automatizada da error y no se lleva a cabo.



Figura 1. Ejemplo en SICA de las carreteras en la provincia de Valencia.

Los planos deben contar con un plano guía a modo de esquema de división por hojas de la UME. Este esquema deberá ser lo suficientemente explícito como para poder

² <https://sicaweb.cedex.es/documentacion/>

localizar a qué hoja corresponde una determinada zona de la UME. La escala de los planos se adecuará a cada ámbito geográfico para que se puedan visualizar los detalles. Por ejemplo se pueden considerar como adecuadas escalas para los planos de infraestructuras de 1:25.000 o 1:10.000 en formato DIN-A3, mientras que en aglomeraciones es recomendable utilizar escalas con más detalle como 1:10.000, o incluso 1:1.000, también en DIN-A3.

2.2. Información para reporte a la C.E.

La Comisión Europea ha establecido un modelo de datos obligatorio mediante el sistema Repornet 3.0. La estructura de datos requerida por la CE se puede consultar en el Anexo de la Decisión de Ejecución (UE) 2021/1967 de la Comisión de 11 de noviembre de 2021 por la que se crea obligatoriamente un archivo de datos y un mecanismo de intercambio de información digital de conformidad con la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

El GPK español es similar al europeo salvo porque además incluye los indicadores obligatorios en España Ld y Le y añade un campo adicional “umeCod”, que permite mantener la trazabilidad las fases anteriores y el DF1_5 de la cuarta fase.

Los archivos a entregar serán:

- Archivo GPK
- Archivo de metadatos del GPK
- Archivo de verificación de metadatos del GPK

Desde la Web de SICA se aportan los siguientes archivos de datos estadísticos (tablas Excel) de apoyo para cumplimentar los datos de las tablas:

- ESTATUnitReference
- Exposure
- ExposureValue

Los datos pueden ser cumplimentados tanto en las tablas Excel, y posteriormente incorporados a la base de datos espacial (GPK), o pueden ser directamente cumplimentados en el GPK.

Cabe destacar que es imprescindible que en el GPK la clave primaria “Primary key” debe ser “id” en lugar de “fid”.

2.2.1. Tabla ESTATUnitReference

Siguiendo la tabla de apoyo su cumplimentación no presenta dificultades.

2.2.2. Tablas ExposureAgglomeration y ExposureValueInAgglomeration

Debido a los problemas que están entrañando, se mencionan los principales aspectos a tener en cuenta en la cumplimentación de las tablas:

- Atributo “ESTATUnitCode”

A pesar de que una UME puede pertenecer a varios códigos LAU³, en este campo debe existir un único código LAU de tal manera que se consiga una combinación única de LAU + (agglomerationIdIdentifier/roadIdIdentifier/railwayIdIdentifier). No se admiten varios códigos LAU concatenados.

- Atributo “noiseSource”

Las fuentes de ruido que se reporten en el DF4_8 deben coincidir con las reportadas en el DF1_5, y sólo debe indicarse una fuente de ruido por celda.

- Atributos “agglomerationIdIdentifier/roadIdIdentifier/railwayIdIdentifier”

Se debe revisar que la codificación sea exactamente la misma entre el DF1_5 y el DF4_8. En caso de que exista el más mínimo tipo de incongruencia, el sistema Repornet detecta la discrepancia y no permite el envío de la información.

Si existe alguna duda acerca de las codificaciones se puede consultar el histórico de comunicaciones a la Comisión Europea de la página Web de SICA.

- Atributo “exposureType”

En el caso de aglomeraciones, el nivel de reporte obligatorio es “mostExposedFacade”, mientras que en el resto de fuentes (grandes ejes viarios, ferroviarios y aeropuertos) hay dos niveles obligatorios de reporte, mostExposedFacade que considera únicamente el ruido fuera de aglomeraciones, y mostExposedFacadeIncludingAgglomeration, que tiene en cuenta el ruido de toda la infraestructura, tanto fuera como dentro de aglomeraciones.

- Atributo “descriptionAllSources”

Este campo únicamente debe cumplimentarse cuando se selecciona el valor de código “agglomerationAllSources” en el atributo noiseSource.

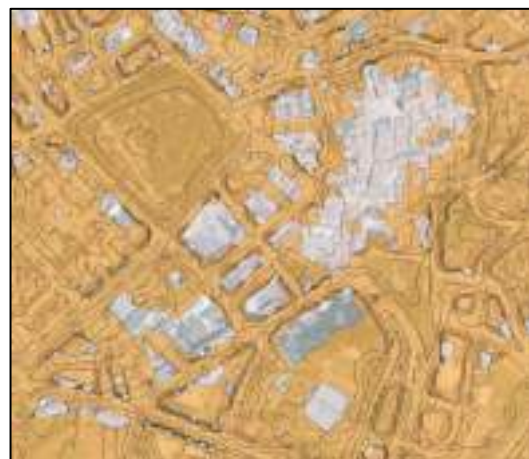


Figura 2. Mapa de recintos isofónicos de una aglomeración.

³ <https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/local-administrative-units>

2.3. Información espacial para IDESICA

La Directiva 2007/2/CE, de 14 de marzo de 2007, del Parlamento Europeo y del Consejo por la cual se establece una infraestructura de información espacial (Inspire) en la Comunidad Europea, traspuesta al ordenamiento interno español por la Ley 14/2010, de 5 de julio, sobre las infraestructuras y los servicios de información geográfica en España (LISIGE), obliga a poner a disposición del público una Infraestructura de Datos Espaciales con la información espacial relacionada con el Ruido Ambiental, de forma que se pueda consultar.

Para ello la documentación requerida a entregar es un GPK (la plantilla está disponible en la Web de SICA). Los aspectos más conflictivos de las capas que lo componen son:

- Atributos “umeCod” y “agglomerationIdIdentifier/ roadIdIdentifier/ railwayIdIdentifier”

Al igual que se ha dicho anteriormente, se debe comprobar que la codificación sea exactamente la misma que la entregada en el DF1_5 y otros archivos que también forman parte del DF4_8.

- Atributos “trafficDay”, “trafficEvening” y “trafficNight”.

Los porcentajes deben figurar en tanto por uno, y la suma de los tres evidentemente debe ser la unidad. Aparecen en las capas “AGG_Rail”, “ROAD_Axes” y, “RAIL_Axes”.

- Atributos “AGG_IndustryLdOperating”, “AGG_IndustryLeOperating” y “AGG_IndustryLnOperating”

Representan el número de horas, en periodo día/tarde/noche, en los que el foco emite ruido. Por supuesto la suma de los tres debe ser como mucho 24 horas. Figuran en las capas “AGG_IndustryPoints”, “AGG_IndustryLine”, y, “AGG_IndustryPolygon”,

- Atributos “###Ld”, “###Le” y “###Ln”

Por ejemplo sería el caso de “AGG_BuildingLd”, “AGG_BuildingLe” y “AGG_BuildingLn” de la capa “AGG_Buildings”, “OperationsLd”, “OperationsLe” y “OperationsLn” de la capa “AIR_Tracks” en el GPK de grandes aeropuertos y otras capas.

Su valor evidentemente no puede ser negativo y la relación entre los tres atributos debe respetar la ecuación:

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right)$$

- Atributos “AGGRoadId”, “AGGRailId”, “AGG_IndustryId”, “AGG_BuildingId”, “AGG_ReceiverId”, “RoadAxisId”, “RailAxisId”, “BuildingId”, “ROAD_ConflictId” y “RAIL_ConflictId”

Deben seguir el esquema “[umeCod]+###”. El atributo “ReceiverId” responderá al tipo “[BuildingId]+###”, y para aeropuertos el atributo “AirTrackId” será de la forma

“[ICAOCod]+###”, por tanto es importante utilizar el los “umeCod” y los “ICAOCod” correctos.



Figura 3. Ejemplo de distintas capas de un GPK IDESICA de un aeropuerto

2.4. ARCHIVOS RÁSTER

La Directiva de Ruido Ambiental establece que los Mapas Estratégicos de Ruido se deben elaborar para cada fuente de ruido de forma individual, lo cual impide la evaluación conjunta del ruido en zonas de solape de fuentes, por ejemplo con dos carreteras o en una zona afectada por una carretera y un aeropuerto.

Con el objeto de obtener una evaluación conjunta de todas las fuentes de ruido, se considera imprescindible disponer de los datos nativos, motivo por el cual se solicitan los RÁSTER Lden y Ln de cada UME que entregan los softwares de ruido.



Figura 4. Ejemplo de RÁSTER ferroviario

Para que sean aceptados tendrán las siguientes características:

- Formato: OGC GeoTIFF Standard
- Sistema de referencia: EPSG 3035
- Resolución: tamaño de pixel 5x5m
- Tipo: Float

3. REFERENCIAS

[1] MITERD-CEDEX, SICAWEB “Documentación” DF1_5 – Instrucciones COMPLETAS de Entrega para la Cuarta Fase. Agosto 2021. <https://sicaweb.cedex.es/documentacion/> (accessed Sep. 8, 2023).

[2] MITERD-CEDEX, SICAWEB, “Documentación”, DF4_8 – Instrucciones COMPLETAS de Entrega de MER para la Cuarta Fase. Marzo 2022 - Actualizado Febrero 2023. <https://sicaweb.cedex.es/documentacion/> (accessed Sep. 8, 2023).

[3] MITERD-CEDEX, SICAWEB, “Documentación”, DF7_10 – AVANCE Instrucciones de Entrega de PAR para la Cuarta Fase. Noviembre 2022. <https://sicaweb.cedex.es/documentacion/> (accessed Sep. 8, 2023).



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AAM-2 Análisis y evaluación del ruido y vibraciones en vehículos silenciosos.

ESTUDIO DEL ESPECTRO DE RUIDO DE RODADURA Y EL PERFIL LONGITUDINAL EN VÍAS CON ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO

*Víctor Fernández Vázquez**
Ángel María Martínez García-Hoz
Fernando Terán Sierra
Santiago Expósito Paje

Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil.
Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, España.

RESUMEN

Uno de los retos de las sociedades actuales es el desarrollo de vías de comunicación urbanas e interurbanas, que cumplan unos exigentes niveles respecto a la reducción del impacto ambiental, así como a la mejora de la seguridad en la conducción y la calidad de vida de las personas que desarrollan su actividad cerca de ellas. El empleo de vehículos eléctricos ha permitido reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la generación del ruido de rodadura sigue estando presente en este tipo de vehículos, especialmente cuando la velocidad de circulación supera los 40 km/h. El ruido de rodadura es la fuente que más contribuye en el ruido ambiental en el entorno de vías con alta densidad de tráfico. A su vez, los altos niveles de contaminación acústica pueden producir problemas de salud en los residentes de estas zonas. Este trabajo se centra en el estudio del ruido de rodadura de una vía con alta densidad de tráfico. Las medidas se realizaron mediante metodología CPX con cámara semianecoica, y se compararon con el perfil de carretera obtenido con perfilómetro láser, con el fin de establecer los niveles de textura de la carretera que más influyen sobre el ruido de rodadura.

ABSTRACT

One of the challenges of today's societies is the development of urban and interurban communication roads, which meet demanding levels regarding the reduction of environmental impact, as well as the improvement of driving safety and the quality of life of people who carry out their activity near them. The use of electric vehicles may reduce greenhouse gas emissions. However, the generation of rolling noise is still present in this type of vehicle, especially when the driving speed exceeds 40 km/h. Rolling noise is the main noise

source of acoustic pollution next to roads with high traffic density. The high levels of noise pollution can cause health problems for residents of these areas. This work focuses on the study of the rolling noise of a road with high traffic density. The measurements were carried out using CPX methodology with a semi-anechoic chamber. Results were compared with the road profile obtained with a laser profilometer, to establish the texture levels that most influence rolling noise.

Palabras Clave— Ruido de rodadura, Textura superficial, Close Proximity Method, Espectro de textura;

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los vehículos eléctricos, así como el aumento de su demanda y uso puede contribuir favorablemente en la consecución de entornos urbanos más limpios. Aunque su implantación en las calles y carreteras de la Red Nacional de Carreteras actualmente está lejos de los objetivos propuestos por la Ley Climática Europea (2021), la cual indica que España debe tener, al menos, 5 millones de vehículos eléctricos o híbridos enchufables en el año 2030 [1, 2]. La progresiva implantación de vehículos eléctricos permitirá reducir en el futuro la generación de gases de efecto invernadero procedente de vehículos de combustión.

A parte de los gases de efecto invernadero, la circulación de vehículos está totalmente relacionada con el ruido ambiental producido por diferentes mecanismos de generación. El ruido de un vehículo en movimiento está generado por diferentes fuentes: El ruido del motor y la transmisión, el ruido aerodinámico y el ruido de rodadura. En el caso de vehículos de combustión, parados o circulando a velocidades inferiores a 40 km/h, el ruido del motor y la transmisión es el dominante. El ruido producido por el

* **Autor de contacto:** victoriano.fernandez@uclm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

contacto entre el neumático y el pavimento, denominado ruido de rodadura, predomina en el caso de velocidades de circulación superiores a 40 km/h, mientras que el ruido aerodinámico, producido por las turbulencias del flujo de aire alrededor del vehículo no adquiere un papel predominante hasta velocidades superiores a 120 km/h, es decir, por encima de los límites legales de circulación [3].

En el caso de los vehículos eléctricos, la generación de ruido por parte del motor y de la transmisión es muy reducida, sin embargo, el ruido producido por el contacto entre el neumático y el pavimento sigue siendo predominante a las velocidades normales de circulación de las vías interurbanas y gran parte de las vías urbanas con mayor densidad de tráfico, ya que este tipo de ruido depende de las características de los neumáticos y la superficie de la carretera. Es por ello que, a parte del desarrollo e implantación de los vehículos eléctricos, la investigación de las causas de la generación de ruido de rodadura, así como de los materiales que pueden ayudar a mitigarlo, es totalmente necesaria para la consecución de entornos más amigables y libres de contaminación.

Este trabajo se centra en el estudio de una vía de alta densidad de tráfico, con el fin de determinar la relación entre la textura de la capa de rodadura y la generación de ruido de rodadura. El trabajo se ha desarrollado mediante medidas in situ y en condiciones reales de circulación.

2. METODOLOGÍA

Las medias de ruido de rodadura se han realizado mediante la metodología Close ProXimity (CPX). El equipo empleado es el Tiresonic Mk4-LA²IC (Figura 1) [4, 5], formado por una cámara semianecoica, dentro de la cual se sitúa un neumático de referencia y dos micrófonos a una distancia específica del neumático y de la superficie de la carretera. El empleo de la cámara permite registrar el ruido producido por el contacto entre el neumático y el pavimento, a la vez que éste se aísla del ruido producido por otras fuentes como el ruido motor o el producido por otros vehículos en circulación.

Durante la auscultación, el nivel de presión sonora se registró cada 0,2 segundos, a una velocidad de referencia de 80 km/h. Los resultados han permitido obtener el espectro de emisión sonora del ruido de rodadura, así como geolocalizar cada dato medido gracias al registro de sus coordenadas GPS.

La auscultación del perfil de textura se ha realizado mediante el equipo LaserDynamicPG-LA²IC [6]. El equipo permite caracterizar la superficie del pavimento de forma georreferenciada y de manera simultánea con las medidas de ruido de rodadura. Las medidas se hacen por medio de un sensor láser.

La superficie auscultada se localiza en la AP-7, en las cercanías de la localidad de Martorell. El tramo auscultado está construido con una mezcla bituminosa en caliente, y cuenta con una longitud de 2,300 kilómetros.



Figura 1. Cámara semianecoica del Tiresonic Mk4-LA²IC.

En la figura 2 se muestran las condiciones de tráfico en las que se realizaron las medidas en el tramo de estudio de la AP-7. Las características de los equipos de auscultación permiten la obtención de datos fiables a la velocidad de referencia y en condiciones de tráfico fluido.



Figura 2. Condiciones de circulación durante la auscultación de la AP-7 en las cercanías de la localidad de Martorell.

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha estudiado el ruido de rodadura de un tramo con alta densidad de tráfico, así como la textura. Las medidas se han realizado simultáneamente y sobre la misma trayectoria, de modo que puedan ser correlacionadas. En la figura 3 se muestran las coordenadas GPS de la trayectoria seguida por el vehículo durante la campaña de auscultación.



Figura 3. Coordenadas GPS (en verde) del tramo auscultado en la AP-7.

3.1. Ruido de rodadura

Se ha determinado el ruido producido por el contacto entre el neumático y el pavimento de forma continua en el tramo de estudio. Las medidas se han realizado a una velocidad de referencia de 80 km/h. Los datos obtenidos se han corregido por velocidad, debido a pequeñas desviaciones respecto a la velocidad de referencia durante la campaña de auscultación.

La figura 4 muestra los resultados obtenidos de emisión sonora debida al contacto entre el neumático y el pavimento. Como se observa en esta figura, el nivel de presión sonora en proximidad, L_{CPr} , registró valores máximos cercanos a los 100 dB(A), y mínimos en torno a 94 dB(A).

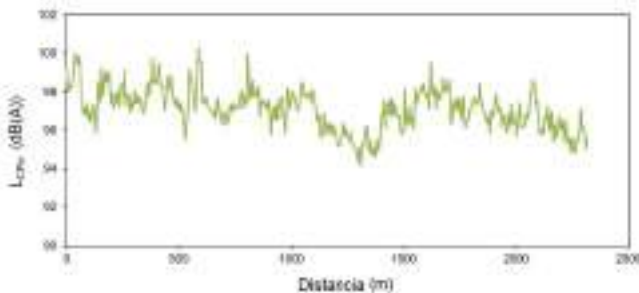


Figura 4. Niveles L_{CPr} corregidos a 80 km/h (AP-7).

A partir de las medidas instantáneas registradas de los espectros de emisión sonora, se han calculado los niveles sonoros de presión sonora globales en todo el tramo auscultado (Figura 4). Con esta técnica de auscultación es posible, por tanto, obtener el espectro de emisión sonora medio de todo el tramo, pero también de cada uno de los puntos mostrados en la figura 4. La figura 5 y la Figura 6 muestran respectivamente los espectros de emisión sonora de las secciones en las que se han registrado el mayor y el menor valor del ruido de rodadura L_{CPr} . Estas secciones están situadas a 600 y 1310 m del inicio del tramo.

3.2. Textura superficial

Las medidas del perfil de la carretera se han realizado de forma simultánea y sobre la misma trayectoria que las medidas de ruido de rodadura. Los datos de textura calculados a partir del perfil permiten la caracterización de los tramos mediante el cálculo de la MPD (profundidad media del perfil) o del IRI (Índice de Regularidad Internacional). A parte de estos datos puntuales, el registro del perfil también permite determinar el espectro de textura (niveles $L_{TX,m}$) del tramo estudiado, con el fin de determinar las longitudes de onda predominantes en cada sección. Los espectros de textura se han determinado cada 10 m de longitud, con una resolución máxima de 100 mm (megatextura). La figura 7 y la figura 8 muestran respectivamente el espectro de textura de las secciones con mayor (600 m) y menor (1310 m) nivel L_{CPr} (figura 4)

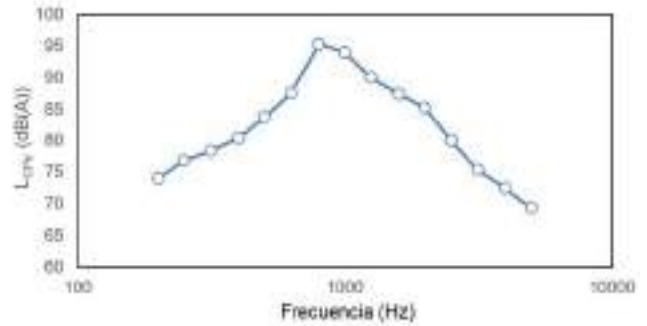


Figura 5. Espectro L_{CPr} máximo a 80 km/h (600 m - AP-7).

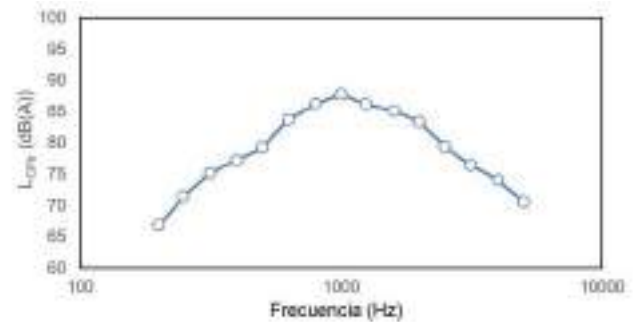


Figura 6. Espectro L_{CPr} mínimo a 80 km/h (1310 m - AP-7).

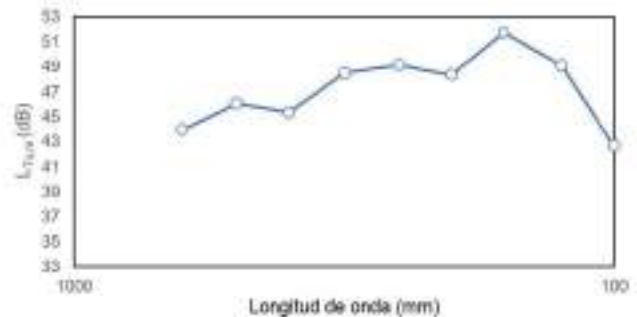


Figura 7. Espectro $L_{TX,m}$ máximo a 80 km/h (600 m - AP-7).

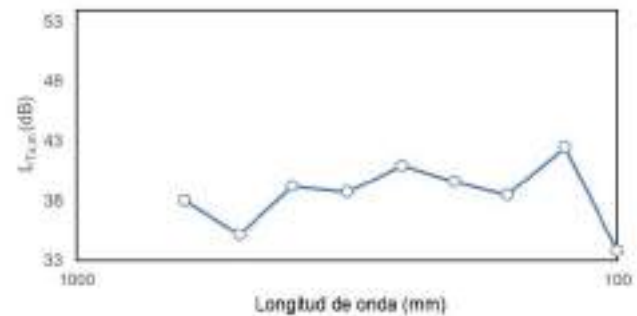


Figura 8. Espectro $L_{TX,m}$ mínimo a 80 km/h (1310 m - AP-7).

Como se observa en las figuras anteriores, secciones con diferente generación de ruido de rodadura también tienen diferencias en el espectro de textura. La textura está relacionada con los niveles de emisión sonora por contacto entre el neumático y el pavimento. Sin embargo, esta relación es aún objeto de estudio.

La representación de los espectros de emisión sonora y de textura superficial a lo largo de todo el tramo permite observar patrones y determinar la relación existente entre ellos. Especialmente la relación de las distintas longitudes de onda del pavimento sobre cada frecuencia del espectro de emisión sonora.

En las figuras siguientes se muestran los espectros a lo largo del tramo estudiado. La figura 9 muestra los espectros de emisión acústica, entre 200 Hz y 5 kHz. El espectro de textura, para longitudes de onda entre 100 mm y 1000 mm, se muestra en la figura 10.

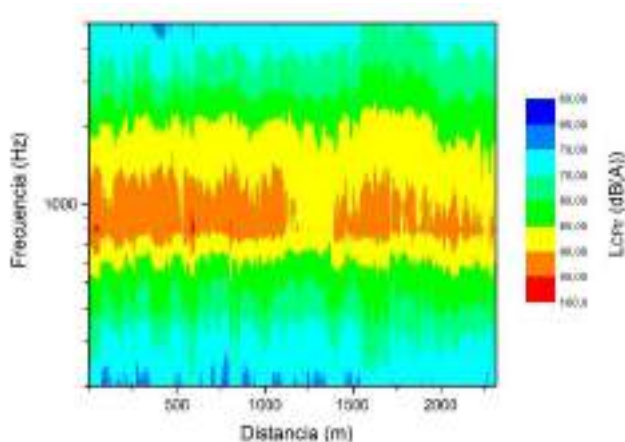


Figura 9. Evolución del espectro de ruido de rodadura L_{CPr} (80 km/h) del tramo estudiado en la AP-7.

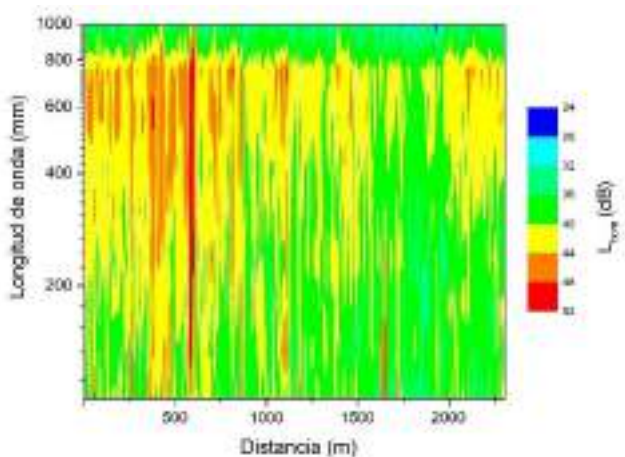


Figura 10. Evolución del espectro de textura ($L_{Tx,m}$) del tramo estudiado en la AP-7.

Tal y como se observa en las figuras anteriores, en algunos de los tramos existe una clara relación entre el ruido de rodadura y el espectro de textura. Este es el caso de la sección localizada a 600 m del inicio. En esta sección se registran los mayores niveles sonoros, y a la vez destaca por sus elevados niveles de textura en todas las longitudes de onda representadas. Sin embargo, en la figura 9 se observan otras secciones con niveles L_{CPr} elevados que se corresponden con niveles de textura $L_{Tx,m}$ reducidos en la figura 10. Este es el caso de las secciones localizadas en torno a 1800 m del inicio del tramo. En este caso, los reducidos niveles de textura no tienen un efecto claro sobre la reducción del ruido de rodadura. En cualquier caso, de acuerdo con los datos, en el tramo se observa una división en torno a la mitad del mismo. La parte inicial, aproximadamente hasta 1100 m, cuenta con una mayor textura y nivel de emisión sonora, mientras que el tramo final tiene claramente menor nivel de textura y ruido de rodadura.

Al analizar estos resultados, es necesario tener en cuenta que, debido a la distancia de muestreo, los espectros de textura se han obtenido para longitudes de onda a partir de 100 mm. Con estas características, los espectros únicamente reflejan la geometría de la capa de rodadura en el intervalo de la megatextura (entre 50 mm y 0,5 m) y de la regularidad superficial (entre 0,5 m y 50 mm). A raíz de los resultados, sería necesario realizar medidas con mayor precisión, cubriendo especialmente el intervalo de la megatextura y de la macrotextura (entre 0,5 mm y 50 mm). Estas medidas permitirían una descripción más detallada de la geometría del pavimento, así como una mejor correlación con los datos de emisión sonora por el contacto neumático/pavimento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la caracterización acústica y superficial de un tramo de vía de alta densidad de tráfico localizado en la AP-7. El objetivo del trabajo es obtener el espectro de emisión sonora del ruido de rodadura y el espectro de textura, con el fin de comparar los resultados y establecer la relación entre ambos métodos de auscultación.

A partir de los datos obtenidos, se ha observado que los mayores niveles de ruido están relacionados con un tramo con elevados niveles de textura en todas las longitudes de onda representadas. Sin embargo, las secciones con menores niveles de textura en las distintas longitudes de onda evaluadas en este estudio, no siempre se corresponden con aquellas con menores niveles de ruido. Para un análisis más detallado sería necesaria la auscultación de la textura superficial con mayor resolución, con el fin de obtener espectros de textura que cubran total o parcialmente los intervalos de megatextura y macrotextura.

A raíz de los resultados obtenidos, consideramos que esta técnica de análisis es adecuada para el análisis del comportamiento de una determinada sección de carretera. La técnica permite profundizar y analizar los niveles de ruido

para las distintas frecuencias, así como los niveles de textura en cada longitud de onda y la correlación entre ambos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los resultados mostrados en este trabajo son parte del Proyecto de I+D+i con referencia: PID2020-118831RB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.



6. REFERENCIAS

- [1] <https://www.race.es/coche-electrico-espana-cuantos-hay>
- [2] May López. *El vehículo eléctrico en España. Situación actual, objetivos y retos a abordar*. OBS Business School. 2021.
- [3] Sandberg, U., Ejsmont, J.A. *Tyre/road reference book*. INFORMEX Ejsmont & Sandberg Handelsbolag, printed by MODENA, Kysa, Sweden; (2002).
- [4] Vázquez, V.F., Terán, F., Paje, S.E., *Dynamic stiffness of road pavements: construction characteristics-based model and influence on tire/road noise*. Sci. Total Environ. 736, 139597; (2020).
- [5] Vázquez, V.F., A.M. García-Hoz, Terán, F., Gil-Abarca, A., Paje, S.E., *Functional characterization of a Cold-In place-Recycled pavement at different stages of the curing process*. Sci. Total Environ. 789, 148065; (2021)
- [6] Expósito-Sobrino, S., Vázquez, V.F., Cámara, A., Paje, S.E. *Evaluation of a pavement Surface renewal for urban traffic noise abatement*. Applied Acoustics 211, 109554; (2023).



ESTUDIO DEL CAMPO SONORO INDUCIDO POR GEOMETRÍAS TRIDIMENSIONALES SOBRE UNA SUPERFICIE REFLECTANTE

Sergio Núñez Andrés¹
Nuria Campillo Davó^{1}*
Miguel Fabra Rodríguez¹
David Abellán López¹
Héctor Campello Vicente¹
Ramón Peral Orts¹

¹Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda. de la Universidad, s/n.
03202, Elche (Alicante), España

* *Autor de contacto:* ncampillo@umh.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

RESUMEN

En la actualidad los vehículos de combustión interna están siendo paulatinamente reemplazados por vehículos con propulsiones puramente eléctricas o híbridas. Esto afecta al ambiente sonoro de las ciudades convirtiendo a la rodadura en la fuente sonora predominante en estos vehículos alternativos. Sin embargo, la reducción sonora conseguida con la ausencia de los motores convencionales conlleva una mayor probabilidad de accidentes debido a la dificultad de ser escuchados en un ambiente urbano.

Con el propósito de poder actuar sobre la propagación sonora de la rodadura a través de nuevos pavimentos que incrementen la percepción acústica de los vehículos eléctricos, este trabajo presenta un estudio preliminar del campo sonoro inducido por geometrías tridimensionales sobre una superficie reflectante. Para ello, se han abordado dos enfoques diferentes de generación acústica, a través de una fuente sonora monopolar y de la vibración de una superficie. Este estudio se ha realizado a través de análisis numérico en condiciones estacionarias en entornos FEM y BEM.

ABSTRACT

Currently, internal combustion vehicles are gradually being replaced by vehicles with purely electric or hybrid drives. This affects the sound environment of the cities turning the road into the predominant sound source in these alternative vehicles. However, the sound reduction achieved with the absence of conventional engines leads to a greater probability of accidents due to the difficulty of being heard in an urban environment.

With the purpose of being able to act on the sound propagation of rolling through new pavements that increase the acoustic perception of electric vehicles, this work presents a preliminary study of the sound field induced by three-dimensional geometries on a reflective surface. To do this, two different approaches to acoustic generation have been addressed, through a monopolar sound source and the vibration of a surface. This study has been carried out through numerical analysis under stationary conditions in FEM and BEM environments.

Palabras Clave— Metasuperficie, Elementos Finitos, Elementos de Contorno, Detectabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido de la interacción neumático/carretera es una de las principales fuentes de ruido en un flujo de tráfico. De hecho, el ruido de rodadura se convierte en la contribución más

importante a la emisión sonora total, superior al ruido del motor en un vehículo de combustión interna, cuando circula a alta velocidad.

La creciente presencia de vehículos eléctricos en las ciudades ha tenido diversos efectos, el más notable es la mejora de la contaminación acústica en estas, aunque como efecto negativo es indispensable hablar del mayor riesgo de atropello [1] que a su vez puede conllevar además de peligro para el resto de tráfico, altos precios de las pólizas de seguros de vehículos eléctricos. Estos hechos son en mayor parte debido al bajo nivel sonoro que emiten al circular.

El propósito del estudio que aquí se desarrolla es realizar un estudio preliminar del campo sonoro inducido por una serie de geometrías tridimensionales sobre una superficie reflectante.

2. OBJETIVOS DE ESTUDIO

El objetivo principal de este estudio es actuar sobre la propagación sonora de la rodadura a través de nuevos pavimentos con el fin de incrementar la percepción acústica de los vehículos eléctricos y evitar la creciente problemática de accidentes en estos vehículos [1], pero para poder llegar a este objetivo se deben perseguir una serie de objetivos parciales:

- 1) Estudio de la acústica en la rodadura.
- 2) Establecimiento de los valores fijos de cálculo.
- 3) Diseño de diferentes modelos, partiendo de los más básicos (referencia).
- 4) Análisis de los modelos empleando el cálculo por FEM (elementos finitos) y BEM (elementos de contorno).
- 5) Análisis y comparación de los diferentes resultados

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En este estudio se han empleado diferentes herramientas que han ayudado a la consecución del mismo, estas son:

- 1) Comsol Multiphysics.
- 2) Autodesk Inventor.
- 3) Sonómetro y equipo de medición.

El trabajo se ha realizado utilizando principalmente el software COMSOL para diseñar y estudiar las diversas metasuperficies.

Se emplearon dos tipos de herramientas de generación de presión acústica:

- 1) **Fuente de Potencia Monopolar:**

En esta tipología se empleó una fuente de potencia monopolar en forma de esfera y colocada a 5 centímetros de altura del pavimento, que asimila a la fuente sonora puntual equivalente que se recoge en el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-EU [2].

Para poder llevar a cabo su cálculo se requirió establecer ciertos valores fijos, por un lado, se limitó la velocidad de estudio a 20 km/h y se calculó la potencia sonora utilizando una fórmula específica.

En un estudio previamente realizado [3] en donde se calculan los decibelios emitidos por un vehículo a diferentes velocidades, se puede ver que la velocidad buscada no aparece, pero el mismo artículo ofrece una fórmula que permite realizar ese cálculo:

$$Lw_A\text{-CPX-II @315 - 4000 Hz} = 21,0 + 39,9 * \log(v) \text{ [dB]} \quad (1)$$

Aplicando esta formulación se puede llegar a la conclusión de que un vehículo circulando a 20 km/h emitiría 73 dB, convirtiendo este resultado a unidades de potencia o vatios a través de la siguiente expresión donde W_0 es la referencia de la potencia igual a 10^{-12} :

$$Lw = 10 * \log(W/W_0) \text{ [dB]} \quad (2)$$

El resultado obtenido por esta ecuación nos proporciona una potencia sonora de 0,00002 Vatios, esta cifra será la que se usará como potencia de la fuente sonora en los diferentes modelos.

La frecuencia de estudio elegida fue de 1000 Hz, para la cual la rodadura de vehículos presenta una elevada emisión sonora.

2) Tapa vibratoria:

Como segundo método de generación de presión sonora se hizo uso de una base dotada de una aceleración normal de 10 m/s^2 [4] que es la aceleración normal media de un neumático al pasar por un pavimento irregular.

Esta aceleración normal fue la que se empleó para hacer vibrar la tapa y excitar el aire que la rodea.

A la hora de realizar el cálculo ha sido imprescindible diferenciar entre qué elementos se iban a calcular por medio de Elementos Finitos (FEM) y cuales por Elementos de Contorno (BEM). En este estudio se ha empleado el cálculo de elementos finitos para el aire encerrado en las geometrías menores como el interior de las ranuras y de la esfera, mientras que el cálculo por elementos de contorno se ha utilizado para las geometrías mayores y el espacio exterior.

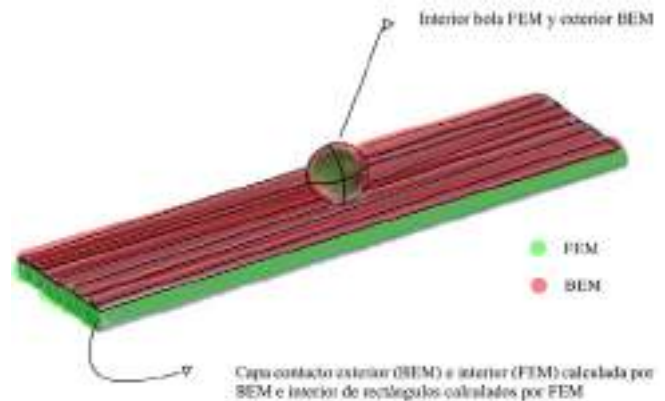


Figura 1. Ejemplo de modelización FEM y BEM.

3. MODELOS ESTUDIADOS

En el presente trabajo se han diseñado, analizado y estudiado diversas geometrías, estas se han dividido en dos tipologías:

- 1) Con Fuente de Potencia Monopolar:
 - a- Modelo de Referencia
 - b- Modelo Conductos Verticales
 - c- Modelo Conductos Horizontales
- 2) Con Tapa Vibratoria:
 - a- Modelo Referencia Tapa
 - b- Modelo Ranura Corta
 - c- Modelo Ranura Larga

A continuación, se va a explicar los diferentes modelos estudiados:

1.a Modelo de Referencia:

El primer modelo, y el más básico de ellos fue analizar el comportamiento de una superficie lisa totalmente reflectante de 4 metros de largo y 1 metro de ancho al someterla a una potencia sonora ubicada en el punto central de una esfera de 5 centímetros de radio y a 5 centímetros de altura con respecto del suelo tal y como indica el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-EU.

Este modelo inicial va a servir como referencia de partida para evaluar los posteriores modelos y comparar el posible efecto de incremento o no de los niveles de presión sonora.

La idea principal de este diseño es simular una carretera lisa sin ningún tipo de meta superficie en ella, esto hace posible el estudio y análisis del modelo más básico.

1.b Modelo Conductos Verticales:

En este segundo modelo se ha partido del modelo de referencia, en él se han labrado varias aberturas de forma cuadrada en el pavimento, estas geometrías se han parametrizado para facilitar su modificación tanto en el número de su distribución en columnas y filas, como en las medidas de cada lado de la abertura y profundidad de la abertura en el pavimento, esto permite obtener y valorar diferentes resultados de funcionamiento.

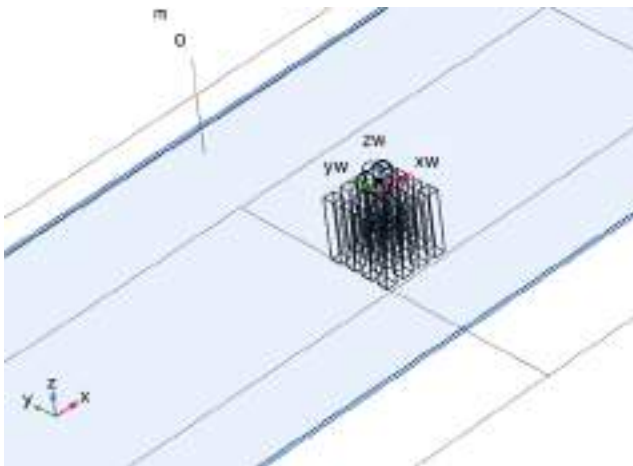


Figura 2. Modelo de Conductos Verticales.

Para un diseño eficiente y seguro para el tráfico se ha tenido muy en cuenta las dimensiones de los cuadrados a fin de evitar que las ruedas de los coches puedan sufrir cualquier tipo de daños al entrar en contacto con ellas. Con el fin de evitar un afecto bache al conducir sobre esta meta superficie se ha escogido un tamaño de sus laterales de 3 centímetros.

Para definir la profundidad de los orificios se ha escogido una frecuencia de 1000 Hz, que teniendo en cuenta que la velocidad del sonido es de 343 m/s, dará como resultado una longitud de onda de 34,3 cm o 0,343 metros, medida que se empleará para la profundidad vertical de cada orificio.

1.c Modelo Conductos Horizontales:

En este modelo se ha pasado de geometrías cuadradas a geometrías rectangulares. Como en la configuración anterior se ha tenido en cuenta la anchura de los neumáticos para que no se dañen al pasar por estos huecos.

En este caso, se le ha dado la longitud de onda al largo del rectángulo en lugar de la profundidad. La configuración general del modelo es básicamente la misma que la del

anterior, pero ha permitido apreciar las variaciones que existen al emplear diferentes formas geométricas.

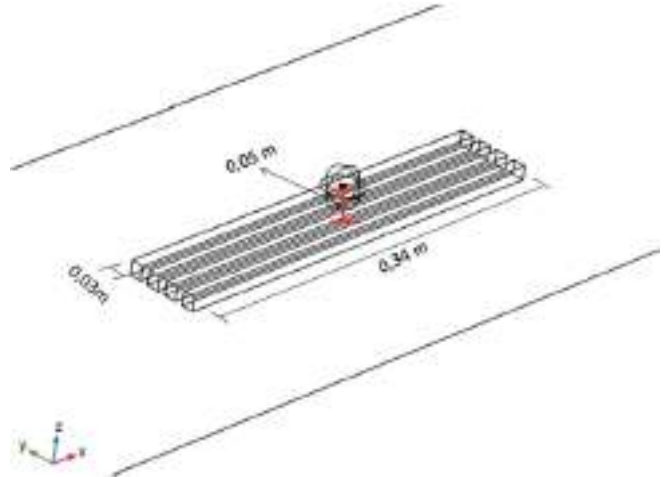


Figura 3. Modelo de Conductos Horizontales.

En la Figura 3 se puede visualizar la forma de la geometría en una representación tridimensional, las dimensiones de las aberturas son de 0,03 metros de profundidad, 0,34 m de largo y 0,03 metros de ancho. Como se ha mencionado con anterioridad la longitud de las aberturas se corresponde con la longitud de onda a 1000 Hz.

2.a Modelo Referencia Tapa:

Este diseño consiste en modelar únicamente la tapa en el pavimento liso de 1 metro de ancho y 4 metros de largo sin ningún tipo de abertura ni extrusión. Gracias a este modelo simple se podrá obtener una especie de guía sobre cómo se propaga la presión sonora y la magnitud en lo que lo hace teniendo únicamente la tapa sin ninguna geometría más, esto permitirá poder analizar los resultados del modelo de Ranura Larga y Ranura Corta.

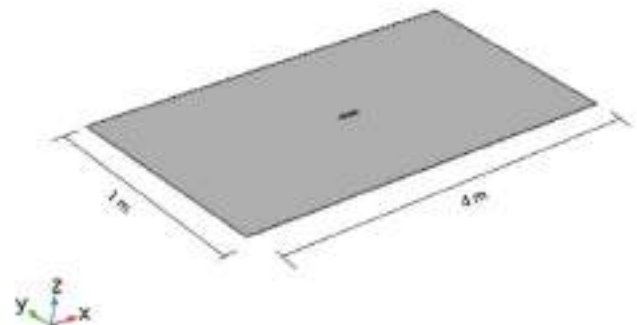


Figura 4. Modelo de Referencia Tapa.

2.b Modelo de Ranura Corta:

En este modelo se ha combinado la geometría del Modelo de Conductos Verticales con el de Conductos Horizontales, es decir la última geometría se basa en un hueco en el pavimento de forma rectangular, cubierto por una tapa con resaltes, esta tapa actúa como objeto BEM, es decir elemento de contorno y al igual que el pavimento que lo rodea es totalmente reflectante. También cuenta con dos aberturas de forma cuadrada colocadas una en cada extremo de la tapa, estas miden 3 centímetros de lado. La función de estas ranuras es actuar como frontera entre el entorno FEM o de elementos finitos que se tiene en el interior de la geometría y el entorno BEM que tenemos en el aire exterior que rodea al modelo.

Los resaltes de la tapa sirven para forzar una frecuencia de 1000 Hz en el interior del modelo, lo que permite que el aire que se encuentra contenido en su interior y el aire próximo a la tapa resaltada se excite y genere una presión sonora que se propagará por la abertura final del modelo.

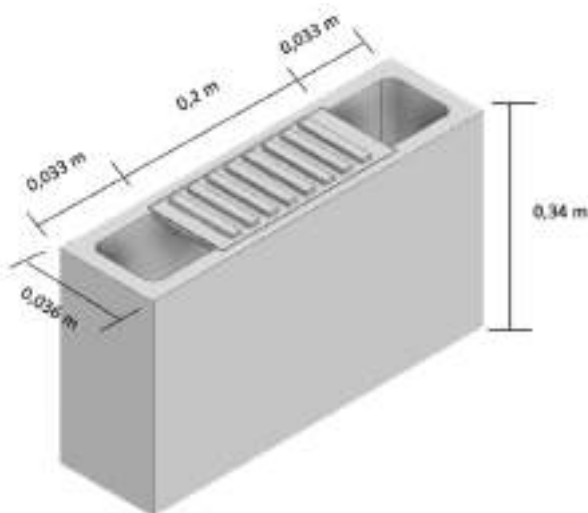


Figura 5. Modelo Ranura Corta.

Al tener un modelo complejo, ya que combina tanto los efectos acústicos como los vibracionales se ha hecho una esquematización o simplificación de los cálculos, es decir, como primera fase se ha diseñado el pavimento como en los primeros modelos y se le ha labrado la geometría deseada.

2.c Modelo de Ranura Larga:

Para este modelo se ha empleado un diseño similar a una metasuperficie real, las dimensiones escogidas han sido 0,03 metros de ancho, 2 metros de longitud total, una tapa central de 0,2 metros de largo y 0,03 metros de ancho, la tapa

mencionada se ubica en el centro de la geometría, dejando una abertura a cada extremo de 0,9 metros.

El funcionamiento del modelo descrito consiste en emplear la tapa de 0,2 metros de largo e inducirle una aceleración normal semejante a la que provocaría un vehículo al rodar sobre la superficie. La longitud de 0,2 metros viene dada por la longitud que apoya del neumático en el pavimento.

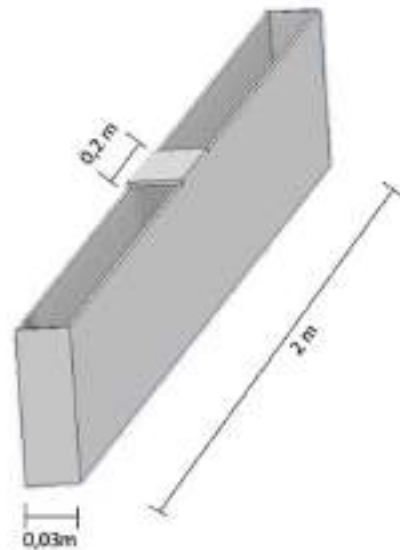


Figura 6. Modelo Ranura Larga.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el propósito de poder analizar y comparar los diferentes modelos en las mismas condiciones, se empleó una opción de COMSOL que permite definir uno o varios puntos de recepción en el sistema.

En el presente trabajo se ha optado por tomar varios puntos situados cada uno a medio metro del anterior, llegando hasta una distancia total de 6 metros, lo que permitirá evaluar de forma numérica el efecto de cada uno de los diseños, compararlos entre ellos y analizar tanto la progresión conforme se aleja de la fuente como la mejora o empeoramiento de la amplificación del sonido con respecto al diseño de referencia, es decir, el diseño ideal en el que todo el pavimento refleja.

Para poder realizar una comparativa óptima, se ha establecido un rango de valores definido e igual para todos los modelos a la hora de realizar sus respectivas representaciones en color de los diferentes datos que ofrece el programa. Este rango ha sido de 45 a 95 decibelios para los resultados de presión sonora expresados en decibelios, y

de -1,5 a 1,5 pascales para la presión sonora expresada en pascales.
 Los resultados gráficos de la primera tipología han sido los siguientes:

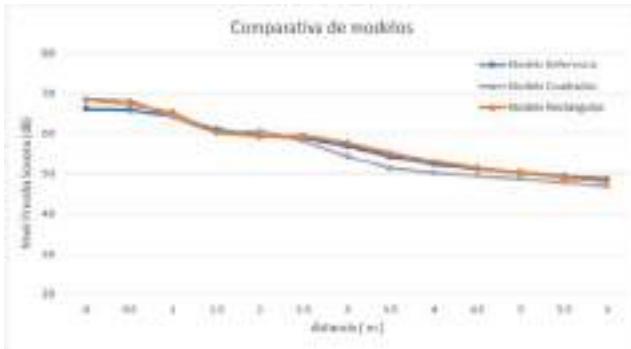


Figura 7. Gráfico comparativo modelos con fuente de potencia monopolar.

En la Figura 7 es muy sencillo ver cómo la progresión de estos modelos ha sido muy similar e incluso en el Modelo de Conductos Verticales se ha producido una disminución de la presión sonora respecto al de referencia.

En la figura 8 se muestra la gráfica comparativa de los modelos de segunda tipología, los cuales han empleado como fuente de excitación una tapa vibratoria.

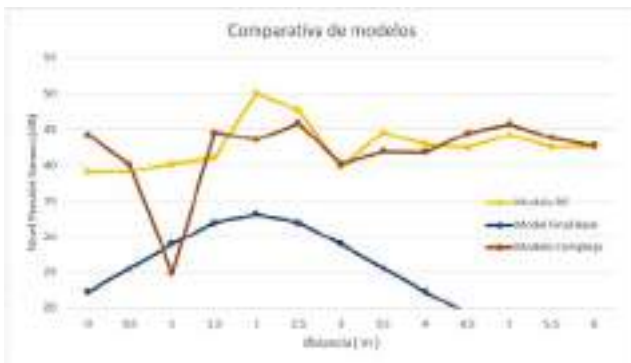


Figura 8. Gráfico comparativo modelos con tapa vibratoria.

En esta tipología se puede ver como respecto a la línea azul la cual hace referencia al Modelo Referencia Tapa sí que hay un aumento muy notable de la presión sonora en los dos modelos restantes, además se puede destacar que el Modelo de Ranura Larga tiene un pico decreciente en el primer metro de avance, pero sin embargo ofrece un mejor rendimiento en los últimos metros de avance.

En la siguiente tabla se muestra numéricamente la progresión de presión sonora obtenida en la segunda tipología de modelos.

Tabla 1. Progresión nivel de presión sonora segunda tipología.

Modelos/Distancia[m]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Modelo Ref Tapa [dB]	25,6	29,0	31,9	33,1	31,9	29,0	25,6	22,3	19,3	16,6	14,2	12,1
Modelo R. Larga [dB]	44,2	40,0	24,9	44,5	43,5	45,8	40,2	41,9	41,8	44,4	45,7	43,8
Modelo R. Corta [dB]	39,1	39,9	40,2	41,0	50,1	47,6	39,7	44,5	42,9	42,4	44,2	42,5

6. CONCLUSIÓN

Este estudio hace referencia a la interacción entre neumáticos de vehículos y metasuperficies de carretera con el objetivo de comprender y aumentar la presión sonora en la dirección longitudinal sin afectar la propagación en direcciones transversales y verticales. El estudio propone el uso de metasuperficies para mejorar la emisión de sonido alrededor de diferentes geometrías de carretera y actuar como resonadores.

Se destacan dos grupos de resultados: uno utilizando una fuente de potencia monopolar en las tres primeras geometrías, donde el modelo de Conductos Horizontales es el más eficiente, y otro utilizando una tapa vibratoria en los modelos restantes, con un mayor rendimiento en el modelo de Ranura Larga, que muestra un pico grande de presión sonora en el primer metro de avance. Ambos grupos logran amplificar el efecto de emisión de sonido en comparación con el modelo Referencia Tapa.

Sería muy interesante abarcar tres áreas de mejora para futuras investigaciones en el estudio de generación de ruido por superficies de carretera y neumáticos: desarrollar modelos de generación de ruido más realistas y eficientes, investigar y diseñar geometrías más complejas para analizar su efecto en la presión sonora, y realizar ensayos prácticos con vehículos reales en geometrías prefabricadas para medir la presión sonora en condiciones reales.

7. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido financiado dentro de la Convocatoria de “Subvenciones a grupos de investigación emergentes - Convocatoria GE 2023” (referencia expediente: CIGE/2022/1), de la convocatoria de subvenciones del “Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana”, de la Conselleria



de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital, de la Generalitat Valenciana.

Así mismo, los autores agradecen el apoyo recibido por el “Programa para la realización de prácticas en actividades de fomento de la investigación en los departamentos e institutos universitarios de la Universidad Miguel Hernández de Elche para el curso 2022/2023” (RR 3236/2022 y RR 00090/2023).

8. REFERENCIAS

[1] Motor, E. (2022, 9 septiembre). Los coches eléctricos provocan accidentes más caros y con más daños. El Motor. <https://motor.elpais.com/coches-electricos/los-coches-electricos-provocan-accidentes-mas-caros-y-con-mas-danos/>.

[2] Stylianos, K., Marco, P., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). En Publications Office of the European Union eBooks. <https://doi.org/10.2788/32029>

[3] Campillo-Davo, N., Peral-Orts, R., Campello-Vicente, H., & Velasco-Sanchez, E. (2019b). An alternative close-proximity test to evaluate sound power level emitted by a Rolling tyre. *Applied Acoustics*, 143, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.017>.

[4] Gunawan, F. E., Yanfi, Y., & Soewito, B. (2015). A vibratory-based method for road damage classification. <https://doi.org/10.1109/isitia.2015.7219943>

ESTUDIO DEL PLANTEAMIENTO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE “SISTEMA DE AVISO ACÚSTICO DE VEHÍCULOS” DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS EN ITV

Héctor Campello Vicente, Miguel Fabra Rodríguez, David Clar García, Emilio Velasco Sánchez, Nuria Campillo Davó, Ramón Peral Orts¹

¹ Universidad Miguel Hernández de Elche, hcampello@umh.es

RESUMEN

El Manual de Procedimiento de Inspección de las Estaciones ITV está en constante evolución con el fin de mejorar la seguridad vial y proteger el medioambiente. Evidentemente esto requiere de un seguimiento de los desarrollos tecnológicos que se puedan aplicar en las estaciones de ITV. En relación con esto, los actuales vehículos híbridos y eléctricos están obligados a instalar sistemas de aviso sonoro para peatones a bajas velocidades (por debajo de 20 km/h) por el Reglamento 138 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas. Estos sistemas, que afectan especialmente a la seguridad en vías urbanas, han sido ideados para evitar posibles atropellos tanto de peatones como de ciclistas y hasta el momento no se dispone de un procedimiento de inspección en el Manual de Procedimiento de la ITV.

Por ello, el objetivo de este trabajo ha sido desarrollar un análisis de las condiciones iniciales a tener en cuenta para plantear un nuevo procedimiento de inspección, que permita evaluar el funcionamiento los sistemas sonoros de advertencia instalados en los vehículos electrificados, bajo las premisas del citado Reglamento y cuyo desarrollo pueda integrarse dentro de los procedimientos de inspección de vehículo la ITV.

ABSTRACT

The Procedure Manual for the ITV (Spanish National Technical Inspection of Vehicles) Stations is constantly evolving in order to improve road safety and protect the environment. This requires monitoring of technological developments that can be applied in the ITV stations. Current hybrid and electric vehicles are required to install audible pedestrian warning systems at low speeds (below 20 km/h) by UNECE Regulation 138. These systems, which particularly affect safety on urban roads, are designed to prevent possible collisions with both pedestrians and cyclists, and so far, there is no inspection procedure in the ITV Procedure Manual.

The aim of this work has been analysing the initial conditions to be taken into account in order to propose a new inspection procedure to evaluate the operation of the audible warning systems installed in electrified vehicles, under the premises of the aforementioned Regulation and whose development can be integrated into the vehicle inspection procedures of the ITV.

Palabras Clave— Warning sounds, vehículos eléctricos, ITV.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia del vehículo eléctrico ha planteado un cambio en el parque automovilístico, el cual ha tenido mayor repercusión en la gestión de la contaminación acústica ocasionada por el tráfico rodado, permitiendo este vehículo la oportunidad de actuar sobre la fuente de emisión sonora.

Las características técnicas actuales de los Vehículos Eléctricos y los Vehículos Híbridos Eléctricos los hacen especialmente adecuados para situaciones urbanas donde las distancias son cortas, los tiempos de conducción controlados y la velocidad de circulación limitada. Sin embargo, la ausencia de ruidos mecánicos (asociados al motor de combustión y transmisiones), así como la presencia de ruido de fondo en los diferentes entornos urbanos, podría llegar a enmascarar el ruido característico de este tipo de vehículos y constituir un peligro para los viandantes, especialmente los más indefensos [1].

La presencia de estos vehículos “silenciosos” como parte del tráfico ha instigado a un cambio en la percepción del ruido del tráfico por parte del peatón, obligando a prestar atención de forma visual, ya que estos vehículos no son perceptibles acústicamente al cruzar una calle debido a la ausencia de ruido a velocidades reducidas aumentado así el riesgo de atropellos.

A causa del problema de seguridad citado anteriormente, en 2017 se publicó Reglamento N° 138 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas [2], el cual establece las características mínimas de sonoridad que deben cumplir los vehículos eléctricos instalando para ello sistemas

de alerta que generen sonidos embarcados en vehículos silenciosos. La entrada en vigor de este reglamento de obligado cumplimiento fue en junio de 2019, siendo esta la fecha a partir de la cual los vehículos de nueva homologación deben instalar algún tipo de Sistema de Aviso Acústico de los Vehículos, denominado SAAV (o Acoustic Vehicle Alerting System AVAS en la terminología anglosajona). Sin embargo, el uso aleatorio de este tipo de sonidos no ha solucionado el problema, ya que pueden resultar inapropiados, excesivos y/o molestos [3]

Por ello las compañías automovilísticas, así como los centros de investigación, llevan trabajando durante años para el desarrollo de sistemas sonoros que sean capaces de adaptarse a las necesidades de conductores, pasajeros y peatones. Los estudios publicados hasta la fecha, muestran, en líneas generales, que las soluciones propuestas son heterogéneas, variando el grado de efectividad sobre el objetivo inicialmente propuesto [4,5].

Independiente de las características técnicas del cada uno de los sistemas propuestos por las compañías automovilísticas, estos sistemas deben funcionar en las condiciones que el Reglamento 138 establece, siendo la característica más significativa su funcionamiento obligatorio en velocidades por debajo de 20 km/h, siendo opcional la desconexión más allá de esta velocidad debido a que el ruido de rodadura se equipara con el ruido generado por un motor de combustión a partir de 25-30km/h.

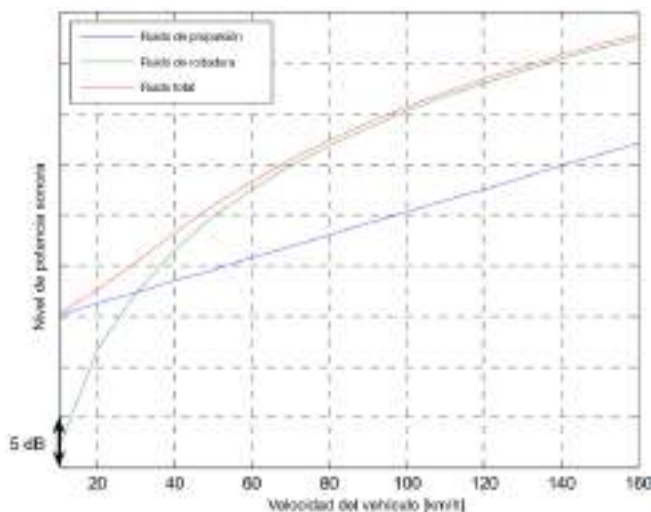


Figura. 1. Contribución de las diferentes fuentes sonoras al ruido de un vehículo ligero [6]

Puestos que estos sistemas están instalados y deben funcionar de forma correcta, es necesario que se inspeccione su funcionamiento en base a la Directiva 2014/45/UE del Parlamento Europeo y del Consejo del 3 de abril de 2014 relativa a las inspecciones técnicas periódicas de los vehículos de motor y de sus remolques [7], donde establece

los requisitos mínimos para un régimen de inspecciones técnicas periódicas de vehículos utilizados para circular por la vía pública.

El presente proyecto partió con el objetivo de definir un punto de partida para el planteamiento de un procedimiento de ensayo y verificación de Sistema de Aviso Acústico de los Vehículos (SAAV) para su posible inclusión en futuras versiones del Manual de Procedimiento de Inspección de Estaciones ITV.

2. ANTECEDENTES

A día de hoy el Real Decreto 920/2017, de 23 de octubre, por el que se regula la inspección técnica de vehículos, prescribe, en el artículo 8, siendo el Manual de Procedimiento de Inspección de las Estaciones ITV [8] el documento donde se detallan los métodos de inspección establecidos de forma que se constituya un procedimiento armonizado de inspección en todo el territorio nacional español.

El mencionado documento sirve a las estaciones ITV, así como a sus inspectores, como guía y rúbrica para desarrollar su actividad como organismos de inspección de todo vehículo registrado en el estado español. El documento se revisa de forma periódica, llevándose a cabo la última revisión la publicada bajo la versión 7.7.0 que entró en vigor el 20 de mayo de 2023, siendo necesario en las próximas ediciones verse reflejadas las prescripciones técnicas necesarias para revisar el correcto funcionamiento de los sistemas SAAV.

En este apartado las necesidades de la inspección son sencillas, el manual cita textualmente que la inspección técnica “debe ser relativamente simple, rápida y barata” por lo que el procedimiento de inspección de los sistemas SAAV tiene que verificar el correcto funcionamiento sin prácticas intrusivas, siendo a su vez repetitivo y sencillo.

El primer paso para proponer un procedimiento de inspección es conocer el funcionamiento de los sistemas y sus propiedades, así como la ubicación de los mismos sobre los propios vehículos. A grandes rasgos las especificaciones técnicas desarrolladas por la Comisión Europea y en consonancia con la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE), dispondría de que estos dispositivos debe producir un sonido desde que el vehículo eléctrico está parado hasta que alcanzar como mínimo los 20 km/h, incrementándose los niveles de emisión a medida que los vehículos aumentan la velocidad desde el inicio de la marcha. A su vez, los sonidos reproducidos deben ser audibles y con tonalidades diferentes en función del sentido de la marcha para reconocer si el coche circula hacia adelante o hacia atrás.

La homologación de los dispositivos según el Reglamento 138 pasa por superar tres ensayos diferentes: marcha adelante, marcha atrás y “cambio de frecuencia”, siendo el ensayo de cambio de frecuencia el que simula el sonido de aceleración de un motor de combustión interna al variar la frecuencia del sonido emitido por el SAAV.

Estos ensayos pueden desarrollarse tanto en ambientes exteriores como interiores siempre que se cumplen las especificaciones que marca el Reglamento 138 para proporcionar resultados equivalentes.

En el caso de desarrollar los ensayos en una pista al aire libre, esta debe ser básicamente llana y cumplir los requisitos de la Norma ISO 10844:2014 [9]. De forma adicional, en un radio de 50 m alrededor del centro de la pista no ha de existir ningún objeto reflectante de gran tamaño como cercas, rocas, o edificios.

A la hora de llevar a cabo los registros sonoros, cerca de los micrófonos no deberá haber ningún obstáculo que pueda influir en el campo acústico. En este caso la persona que supervise los ensayos deberá estar situada de manera que no influya en las indicaciones de este.

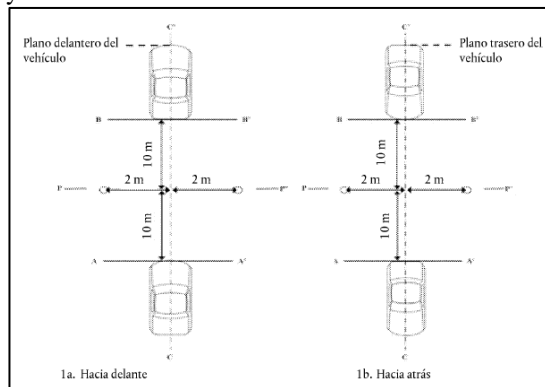


Figura 2. Posiciones de medición para vehículos en movimiento en el exterior

Estas pruebas también pueden realizarse en ambientes interiores, siempre y cuando las instalaciones donde se desarrollen los ensayos sean espacios semianecoicos en determinadas condiciones.

Salvando las distancias entre las condiciones entre la pista de ensayos ISO y las líneas de inspección de las estaciones de ITV, podría pensarse que las condiciones de espacio para llevar a cabo registros sonoros podrían cumplirse, siendo la principal característica en este caso un espacio 2 metros hacia el lateral del vehículo desde la línea media, tal y como se observa en la figura 4.



Figura 4. Ejemplo de box acústicamente acondicionado

Independientemente de que las condiciones geométricas permitiesen la colocación de los sistemas de adquisición, sería inviable por peligrosidad la reproducción de las pruebas de homologación y deben plantearse pruebas que comprueben el correcto funcionamiento de estos SAAV.

Para ello deberían verificarse los valores mínimos de sonoridad que los sistemas han de ser capaces de emitir en las diferentes condiciones en su homologación, las cuales se diferencian entre velocidades a 10 km/h, 20 km/h y marcha atrás, siendo los valores mínimos los que se muestran en la siguiente tabla extraída directamente del propio reglamento [2]:

Tabla 1. Requisitos relativos al nivel sonoro mínimo global en dB(A)

Estación de ITV		Rango de velocidad constante punto 1.1.1 (10 km/h)	Rango de velocidad constante punto 1.1.1 (20 km/h)	Prueba marcha atrás punto 1.1.1
Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2	Columna 1
Global		58	58	47

En esta tabla han sido obviados los valores mínimos por frecuencias, puesto que se entiende que un análisis por frecuencias sería poco efectivo llevarlo a cabo durante una inspección en las líneas ITV.

Como se observa en la Tabla 1, los valores mínimos son valores relativamente bajos si se comparan con niveles sonoros de entornos urbanos donde la propia actividad de la vida generaría valores similares a ellos en ambientes relativamente poco ruidosos.

Esta aproximación de los valores hace que identificar la aproximación de los vehículos eléctricos en ocasiones sea una tarea complicada, existiendo gran cantidad de trabajos de grupos de investigación relacionados con tiempos de reacción, efectividad de estos sonidos incluso sensaciones de los peatones al percibirlos.

Si se trasladan los valores de ruido mínimo de los sistemas SAAV a las estaciones ITV como la actividad industrial que es, el principal problema a la hora de desarrollar un procedimiento de inspección será el cómo evitar el ruido de fondo existente en las líneas por el mero hecho de desarrollarse allí actividades con vehículos.

Con esta premisa del ruido se han desarrollado diferentes pruebas sonoras sobre vehículos eléctricos con sistemas SAAV, con el objetivo de plantear una propuesta inicial de procedimiento de inspección para estos sistemas a incluir en el manual de procedimiento de estaciones ITV.

3. OBJETIVO

El presente trabajo busca definir un procedimiento que permita inspeccionar los sistemas sonoros empleados para emitir los sonidos de alerta de proximidad, bajo las premisas del citado reglamento y cuyo desarrollo pueda integrarse dentro de los procedimientos de inspección de vehículos ITV. Para llevar a cabo este trabajo ha sido necesario estudiar las características reglamentarias de estos sistemas, para plantear un posible procedimiento de inspección viable en estaciones ITV.

En principio, se ha buscado ubicar los ensayos dentro de las líneas de inspección de las estaciones ITV, condicionando la inspección a las diferentes condiciones de funcionamiento de los sistemas AVAS para la determinación de los parámetros a evaluar, así como el tipo de instrumentación si fuese necesaria para ello.

4. METODOLOGÍA

En este apartado van a desarrollarse las metodologías de ensayo que se han ido desarrollando a lo largo del desarrollo de este trabajo para lograr el objetivo planteado, aplicando para ello la experiencia en este campo del Laboratorio de Ingeniería Acústica y Vibraciones de la Universidad Miguel Hernández de Elche (LIAV).

Como punto de partida de la parte experimental para la elaboración de un procedimiento de inspección fue reproducir los ensayos de homologación marcados por el Reglamento 138, inspeccionando los vehículos previamente para conocer la ubicación de los sistemas SAAV, modos de conducción, sistemas de propulsión, etc.

El desarrollo del ensayo de homologación de los sistemas SAAV se desarrolló en las instalaciones de la Universidad Miguel Hernández de Elche, donde no se cuenta con las características ISO del pavimento necesarias para llevar a cabo los ensayos según la normativa, pero su reciente construcción garantizaba unas condiciones de ensayo válidas, teniendo en cuenta para los ensayos condiciones de absorción

y humedad del firme, así como las condiciones meteorológicas aptas para el registro sonoro.

El primero de los ensayos desarrollado relacionado con los sistemas de alerta fue aplicar la metodología Pass-By[9] empleando para ello un vehículo eléctrico Tesla Model 3 de 2022 en su versión Estándar Plus RWD, el cual circula por la pista de ensayos a diferentes velocidades entre 5km/h y 25km/h. Este vehículo cuenta con un SAAV incorporado de fábrica de acuerdo a la normativa, que no puede ser desconectado [2], por lo que el sonido de alerta permaneció activo durante la realización de los ensayos.

En cuanto a la forma de realizar las mediciones, en estos ensayos se emplearon dos tipos de instrumentación bien diferenciada, por un lado, un sonómetro integrador 2250 tipo I del fabricante Bruel & Kjaer y por otro lado un sistema mucho más avanzado, una cámara acústica de la empresa Track-Noise.



Figura 7. Ensayos Pass-by empleado la cámara acústica

Este sistema de medición sonora fue empleado con 2 propósitos, por un lado, ubicar los sistemas de alerta instalados en los bajos del vehículo y por otro lado como equipo de registro sonoro. Las capacidades de este sistema permiten grabar un video del paso del vehículo mientras se visualiza la generación del vehículo así como su propagación en 2D.



Figura 8. Ensayos Pass-by empleado la cámara acústica

Una vez ubicados los puntos de emisión aproximados en diferentes vehículos eléctricos e híbridos, ya que cada fabricante ubica los sistemas según su criterio, se decidió llevar a cabo una cuantificación de la potencia sonora emitida

por los sistemas de advertencia en parado como posible extrapolación a las líneas de inspección técnica. Dicha cuantificación se decidió llevar a cabo en base a la norma ISO 3744 [10], desarrollando la prueba en las inmediaciones de la pista de ensayos de la UMH para tener unas condiciones de contorno similares entre ensayos.

Dicho método desarrolla las premisas de registro y evaluación de los niveles de presión acústica sobre una superficie de medición que envuelve a la fuente y para el cálculo del nivel de potencia acústica emitido por esa fuente, considerándose en este caso la fuente de ruido, un speaker, se encuentra a unos 40cm de altura respecto al suelo ubicado sobre los bajos de los vehículos.

El método empleado para llevar a cabo los ensayos consideraría el vehículo como una superficie reflectante sobre la que estaría apoyada en este caso la fuente de sonido, envolviendo este con 6 puntos de medición ubicados mediante las relaciones geométricas que marca la norma ISO 3744.



Figura 9. Superficie de medición empleada en los ensayos

Este método condiciona la posibilidad de ser empujado a dos condiciones, siendo la primera de ellas una condición de contorno en la cual se consideran las posibles reflexiones en el entorno, y una segunda corrección relacionada con el ruido de fondo para la cual la norma describe las correcciones a tener en cuenta durante el análisis de los resultados.

5. RESULTADOS

En este apartado van a mostrarse un extracto de los resultados obtenidos durante el estudio para llevar a cabo una propuesta previa para el planteamiento de un procedimiento de inspección de los sistemas SAAV en estaciones ITV.

El primero de los ensayos fue basado en la reproducción de los ensayos de homologación, circulando un vehículo por una pista ubicando el equipo de medición perpendicular a la vía a 2 metros de distancia del punto medio del vehículo y el equipo de medición a 1,2 metros de altura.

En este caso se muestran los resultados de asociados a 2 vehículos eléctricos puros y un tercero híbrido enchufable, circulando en todo momento con los sistemas SAAV conectados y un ruido de fondo medio de 51,1dB(A).

Tabla 2. Registros sonoros en base al Reglamento 138 en dB(A)

	TESLA MODEL 3	TESLA MODEL Y	OPEL GRANDLAND
0 Km/h	57,1	55,8	--
10 Km/h	61,7	59,4	61,1
20 Km/h	61,6	63,5	64,5

En este apartado puede comprobarse que los vehículos mostrados en este caso superan los valores mínimos a emitir mostrados en la Tabla 1, no teniéndose valores en parado del último vehículo ya que muchos de los sistemas SAAV se conectan una vez se inicia la marcha del vehículo.

Una vez expuestos los valores registrado y comparando con el ruido de fondo, puede suponerse que es difícil reconocer la presencia de estos vehículos forma auditiva a bajas velocidades puesto que la diferencia con el ruido de fondo es menor a 10dB(A) como margen auditivo para la diferenciación de sonidos.

Tras la extracción de estos resultados, se decidió llevar a cabo ensayos en base a la Norma ISO 3744 sobre varios vehículos. En este caso varios de los vehículos no han podido ser ensayados para obtener la potencia sonora de sus sistemas SAAV por la configuración de la desconexión de los sonidos de alerta cuando el vehículo se encuentra parado. En este caso se van a mostrar los resultados obtenidos para 2 vehículos Tesla mencionados anteriormente.

Tabla 3. Niveles de potencia sonora según ISO 3477 en dB(A)

	POTENCIA	FONDO
TESLA MODEL 3	58,4	48,5
TESLA MODEL Y	58,8	48,8

A la vista de los resultados obtenidos, se hace necesario para llevar a cabo cualquier inspección de los sistemas SAAV en ITV un ruido de fondo relativamente bajo. Para poder considerar la posibilidad de realizar ensayos en las estaciones ITV en base al ruido de fondo existente, se ha echado mano de la base de datos de registros sonoro del LIAV de los últimos 4 años del ruido de fondo registrado en varias estaciones durante las revisiones sonoras de los boxes destinados a la medición del ruido de ciclomotores de la Comunidad Valenciana.

Estas mediciones de ruido de fondo se llevaron a cabo para las condiciones de box cerrado con los sistemas de extracción de humo conectados y desconectados, así como con puertas abiertas en algunos de los boxes según sus condiciones técnicas.

Tabla 4. Niveles de ruido de fondo en diferentes estaciones ITV en dB(A)

	Box Cerrado ON	Box Cerrado OFF	Box Abierto
FONDO MEDIO	66,3	57,7	61,1

Como puede comprobarse, el llevar a cabo registros sonoros sobre los sistemas SAAV sería una tarea complicada debido a la proximidad entre los niveles emitidos y el ruido de fondo que puede haber en las estaciones ITV, por ello hasta el momento únicamente se plantea como punto de partida el entrenamiento de los inspectores ITV para detectar el funcionamiento de los sistemas en base a sus percepciones.

En el caso de optar por llevar a cabo registros, las condiciones de aislamiento que deberían conseguirse para la línea de inspección de vehículos electrificados tendría un coste elevado, y en el caso de que los sistemas no funcionasen a vehículo parado habría que estudiar la forma de generar el movimiento para la conexión dentro de instalaciones aisladas.

6. CONCLUSIONES

Tras los trabajos realizados y en vistas de proponer un nuevo procedimiento de inspección de los sistemas de alerta instalados en vehículos electrificados, pueden obtenerse diferentes conclusiones.

La primera de ellas es relativa al ruido de fondo, siendo este el primer condicionante a la hora de verificar el funcionamiento de los sistemas SAAV, debido a los altos niveles de ruido de fondo existentes en las líneas de inspección los cuales enmascaran los sonidos emitidos. En este caso se considera inviable económicamente el aislamiento sonoro de cualquier línea ITV para el desarrollo de la verificación del funcionamiento de estos sistemas.

Por otro lado, la conexión de los sistemas SAAV una vez se inicia la marcha del vehículo en algunos vehículos imposibilita el desarrollo de cualquier tipo de prueba en estático del mismo modo que suelen realizarse las pruebas de otros dispositivos según el Manual de Procedimiento ITV.

Por ello en este trabajo se plantea la necesidad de desarrollar un programa de “entrenamiento” de los inspectores para reconocer los sonidos de advertencia de los vehículos durante el paso por la línea de inspección, con el objetivo de verificar

el funcionamiento de estos sistemas mediante la percepción sonora de los mismo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se enmarca dentro de la Cátedra ITEVEBASA de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Esta Cátedra está financiada por el Grupo ITEVEBASA S.A. y su principal objetivo es la mejora en los procesos, equipos y medios que se emplean durante la Inspección Técnica unitaria de los vehículos.

12. REFERENCIAS

- [1] Branda, S; Petria, M; Haasa, Ph; Kretteka, Ch; Haasper, C. (2013) Hybrid and electric low-noise cars cause an increase in traffic accidents involving vulnerable road users in urban areas. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, Volume 20, Issue 4.
- [2] Regulation No 138 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility, 2017.
- [3] Salleh, I; Zain, M. M; Hamzah, R. R. (2013). Evaluation of annoyance and suitability of a back-up warning sound for electric vehicles. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 8, 1267.
- [4] Jen, MU; Lu, MH. (2011) Warning sound of electric vehicle for pedestrian safety. 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2011, INTER-NOISE 2011.
- [5] Parizet, E; Robart, R; Chamard, JC; Schlittenlacher, J; Pondrom, P; Ellermeier, W; Biancardi, F; Janssens, K; Speed-Andrews, P; Cockram, J; Hatton, G. (2013) Detectability and annoyance of warning sounds for electric vehicles; *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Volume 19.
- [6] G. Blokland y B. Peeters, «Modeling the noise emission of road vehicles and results of recent experiments» de *Internoise*, Ottawa, Canadá, 2009.
- [7] Directiva 2014/45/UE del Parlamento Europeo y del Consejo del 3 de abril de 2014 relativa a las inspecciones técnicas periódicas de los vehículos de motor y de sus remolques.
- [8] Ministerio de Industria, Turismo y comercio de España. Manual de Procedimiento de Inspección de las estaciones ITV. eNIPO: 112-23-003-0.
- [9] ISO 10844, Acoustics – Specificacion of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres. *International Organisation for Standardization*, Geneva, Switzerland, 2011.
- [10] ISO 3744, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane, *International Organization for Standardization* 1994.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AAM-3 Paisajes sonoros urbanos.

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE GRABACIÓN ASEQUIBLES PARA PAISAJES SONOROS

Roberto San Millán-Castillo^{1}*
Ignacio López-Peñalver¹
Leticia Martínez-Cano²
Eduardo Morgado¹
Luca Martino¹

¹Universidad Rey Juan Carlos – EIF – Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Camino del Molino, 5, Fuenlabrada (Comunidad de Madrid, España)

²Universidad de Castilla-La Mancha – ITct – Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones, Campus Universitario, s/n, Cuenca (Cuenca, España)

RESUMEN

El estándar ISO 12913-2 proporciona información sobre la recogida de datos en investigaciones y estudios relacionados con paisajes sonoros. Uno de sus puntos claves es el ambiente acústico. Para ello, recomienda el uso de sistemas calibrados y normalizados de grabación binaural, concretamente cabezas artificiales. Estos sistemas ofrecen ventajas, pero también inconvenientes. Este trabajo evalúa el comportamiento de técnicas de grabación alternativas más accesibles: un teléfono móvil, una grabadora estéreo y unos auriculares binaurales. Los resultados arrojan reflexiones sobre el estándar y podrían favorecer un desarrollo más dinámico de la investigación en paisajes sonoros.

ABSTRACT

ISO 12913-2 provides information about data collection in soundscape studies and research. To this end, the standard recommends calibrated and standardized binaural recording systems, particularly head and torso simulators. These systems provide benefits but also some drawbacks. This work assesses the performance of alternative and more affordable recording techniques: a smartphone, a stereo recorder, and some recording binaural headphones. The results lead to some considerations of the standard and may contribute to a more active development of the research in soundscapes.

Palabras Clave— Paisajes Sonoros, Sistemas de Grabación, binaural.

* **Autor de contacto:** roberto.sanmillan@urjc.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

La distancia notable que existe entre la teoría y la práctica en la investigación de Paisajes Sonoros (PS) se pone de manifiesto en [1,2]. En lo que a instrumentación se refiere, se destaca el efecto de diferentes configuraciones de captación de PS. La norma ISO 12913-2 recomienda el registro de señales binaurales mediante simuladores de cabeza y torso (HATS). Sin embargo, en la comunidad científica surgen cuestiones relacionadas con las ventajas de utilizar sistemas de instrumentación complejos y costosos frente a otros más sencillos y asequibles.

El sonido binaural recrea una sensación próxima a la realidad en tres dimensiones, permitiendo una localización precisa de las fuentes sonoras implicadas. Sin embargo, la puesta en práctica es compleja. Uno de los principales problemas es la obtención de una respuesta de transferencia de la cabeza adecuada (i.e., Head Related Transfer Function, HRTF), y que recoja con fidelidad las diferencias de fase entre los dos oídos y la influencia de la cabeza y el torso humanos. Esta HRTF es única para cada persona y, además, no suele recoger posibles movimientos de la cabeza de los usuarios. Estas diferencias se pueden subrayar si el sistema de reproducción carece de un control exhaustivo de fase sobre las señales [3, 4]. Aun así, existen bases de datos de HRTFs que mejoran significativamente estos inconvenientes [5].

Por otro lado, los resultados de la investigación en [2], que compara las grabaciones de PS mediante grabación monoaural y binaural, sugieren que las primeras son

suficientes para evaluar la mayoría de los descriptores de PS, incluyendo la impresión general, el confort acústico, lo agradable, lo molesto, lo memorable y la sonoridad. Eso sí, destaca que las grabaciones binaurales darán una percepción más consistente que la monoaural en escenarios más reverberantes; como ocurre en otros artículos que destacan esa riqueza que ofrece la captura binaural [6, 7, 8].

Otra cuestión importante es la distorsión del entorno y el contexto que puede generar el uso del HATS o micrófonos ambisónicos, y las diferencias incluidas en los PS debido a su presencia; dado que son elementos extraños a prácticamente la totalidad de ambientes sonoros reales. Además, la existencia de alternativas sencillas facilitaría la obtención de datos en múltiples escenarios para dinamizar la investigación, la difusión, la práctica en PS.

Ya en algunas universidades se utilizan los teléfonos móviles para familiarizar e introducir a los estudiantes en los PS, ya que la instrumentación asociada suele ser cara y difícil de usar [9]. Otros estudios comparan la inteligibilidad binaural en el habla mediante pruebas en remoto, donde los usuarios utilizan sus cascos personales, dándose una gran variedad tanto en la calidad como en el coste económico. El resultado de este estudio es una diferencia muy pequeña entre las pruebas remotas realizadas a través de Internet, y las pruebas perfectamente calibradas en el laboratorio. La conclusión del estudio lleva a valorar los métodos y herramientas que tenemos al alcance de la mano y explorar sus posibilidades de uso [10].

Esta comunicación presenta un experimento en el que se emplean y se comparan técnicas de grabación sencillas y asequibles para la evaluación de PS mediante encuestas a una muestra de población. Los resultados arrojan reflexiones interesantes que podrían ser útiles para mejorar y generalizar procedimientos y recomendaciones de investigación y normativos. Tras esta introducción, este documento se organiza como sigue: la Sección 2 expone la metodología empleada en el estudio, la Sección 3 presenta los resultados y los discute, y, por último, la Sección 4 recoge las conclusiones de este trabajo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Equipamiento

Para realizar las grabaciones de los entornos sonoros, se emplearon tres sistemas de grabación, y un sistema de medición, común a las configuraciones de grabación.

Las grabaciones monoaurales se realizaron en primer lugar con el *smartphone Huawei Smart P 2019* [11]. En este caso, se debe contemplar el procesado de señal de la unidad, existente, pero desconocido: transductores, *firmware*, *software*, sistema operativo, filtros reductores de ruido,



Figura 1. Izquierda, grabadora estéreo; Derecha, auriculares binaurales.

beamforming, y control de automático de ganancia, por nombrar algunos.

El siguiente sistema es una grabadora estéreo común y económica, *Zoom H1 Handy recorder*. Se basa en la técnica X/Y, con dos micrófonos omnidireccionales formando un ángulo de 90° [12], ver Figura 1.

El último sistema evaluado son unos auriculares inalámbricos binaurales asequibles: *Hooke Verse Mobile 3D Audio* [13], con micrófonos omnidireccionales *electret*, ver Figura 1.

Los sistemas de grabación comparados no son capaces de medir adecuadamente el nivel sonoro del entorno debido a su arquitectura, calibración, e incluso procesado de señal. El uso complementario del sonómetro nos ayudará a recrear los valores reales de presión sonora del ambiente acústico durante la grabación. Así, los participantes escucharán las tomas de PS al mismo nivel que *in situ*. Para esta tarea utilizamos el sonómetro SC310 de Clase 1 [14]. Para verificar la calibración del sonómetro, antes y después, de cada medición, utilizamos el calibrador acústico Rion, modelo NC74.

También se emplearon accesorios de relevancia como: auriculares, para verificar los registros de audio, pantallas anti-viento, al tratarse de grabaciones en el exterior; trípode 'ad hoc', para simultanear la medición con el sonómetro y los sistemas de grabación en un punto próximo para que sean equivalentes.

En la evaluación de los participantes, utilizamos el equipo *Creative Inspire T3300*, sistema de altavoces 2.1, compuesto por dos altavoces y un subwoofer con puerto de graves y salida inferior [17, 16]. Audacity se emplea para la edición de las tomas, modificación de ganancias, y normalización de duración a 30 segundos, principalmente.



Figura 2. Diagrama de bloques del procesado de datos y señales.

2.2. Grabación de Paisajes Sonoros

Antes de realizar cualquier medición, se verifica el sonómetro. El sonómetro se coloca en el trípode, apuntando en el mismo sentido que los sistemas de grabación, y en una posición típica del oyente del PS. El trípode permite una grabación con todos los dispositivos simultáneamente, dejando así las manos libres para manipularlos.

Las tomas duraron entre 1 y 3 minutos, dependiendo del lugar. Por ejemplo, en PS monótonos se reducía el tiempo de toma. La duración de los audios de las pruebas se normalizó a 30 s. La normativa [17], hace hincapié en que la duración de las grabaciones de PS tiene que durar un mínimo de 3 minutos, pero debemos tener en cuenta la capacidad de atención que puede tener un participante medio, cuya concentración se estima entre 10 y 20 minutos [19].

Tras la elección de los audios, su procesado y metraje, ver Figura 2 y [20] para más detalles, se realiza una prueba para evaluar la duración de una evaluación completa, es decir, escuchar los audios y contestar a las preguntas. Después del simulacro, decidimos acortar el número de PS, pasando de seis a tres, por lo que la duración pasó de una hora a treinta minutos aproximadamente, algo que favoreció al correcto desarrollo del experimento. Unos de los motivos por lo que se decidió acortar la prueba fue, de nuevo, por la capacidad de concentración que mostraron los participantes. Los PS seleccionados están situados en el centro la ciudad de Madrid (España): Puerta de Alcalá, Estación de Atocha-Renfe, Parque de El Retiro. Estas ubicaciones ofrecen diversidad de fuentes asociadas a su actividad y, por tanto, la respuesta afectiva variará hipotéticamente: animales, fuentes, personas, trenes y coches, entre otros.

Los audios escuchados por los participantes mantienen el nivel de presión sonora de la ubicación a través de procedimiento de verificación del nivel de audio descrito en la Figura 3. Con Audacity se genera un tono puro de 1 KHz y ajustamos la ganancia de la señal y de los altavoces hasta medir con el sonómetro 94 dB. Tras exportar el audio en

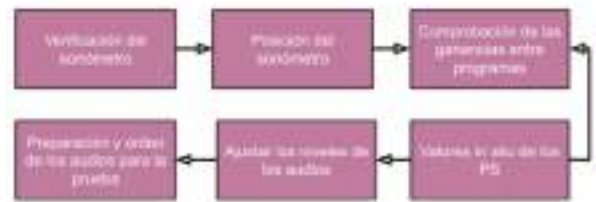


Figura 3. Diagrama de bloques de la verificación del nivel de audio de los PS.

formato WAV de Audacity, se reproduce con VLC y comprobamos el nivel. VLC aumenta la ganancia de los archivos alrededor de 5 dB, sabiendo está diferencia de ganancias ya podemos calibrar nuestros audios de forma correcta con los datos de la campaña de grabación.

En cada prueba se siguió la misma secuencia: reproducción del primer PS calibrado con los tres dispositivos; tras esto se procedía con el siguiente PS. Se contó con un entorno controlado donde el ruido de fondo en la sala satisfacía un $L_{Aeq} < 30$ dBA.

2.3. Cuestionarios y Evaluación de PS

En la recopilación de datos se toma como referencia la norma ISO 12913-2 [17]. La evaluación se realiza con una escala de cinco puntos y el cuestionario se presenta convenientemente a los participantes, asegurando su comprensión.

En cuanto al reclutamiento de participantes, fue voluntario, por lo que pudimos excluir la participación de personas con problemáticas en su salud otológica. Dado el carácter exploratorio e inicial de la investigación, así como el alcance en términos materiales, se empleó un modelo de muestreo no probabilístico por bola de nieve [21]. Éste consiste en que los individuos seleccionados para ser estudiados reclutan a nuevos participantes entre sus conocidos. El proceso de creación de una muestra mediante bola de nieve se fundamenta en obtener contactos iniciales, pedirles su participación y solicitar, una vez finalizada la prueba, el acceso a otros contactos. Estos contactos iniciales procederán de personas del entorno de los investigadores de este estudio y los criterios de selección son: salud otológica, interés por el estudio y buena actitud para la participación en el mismo, y capacidad de realización del cuestionario asociado sin asistencia. Este trabajo fue aprobado por el Comité de ética de la URJC pues recabó datos personales de los participantes.

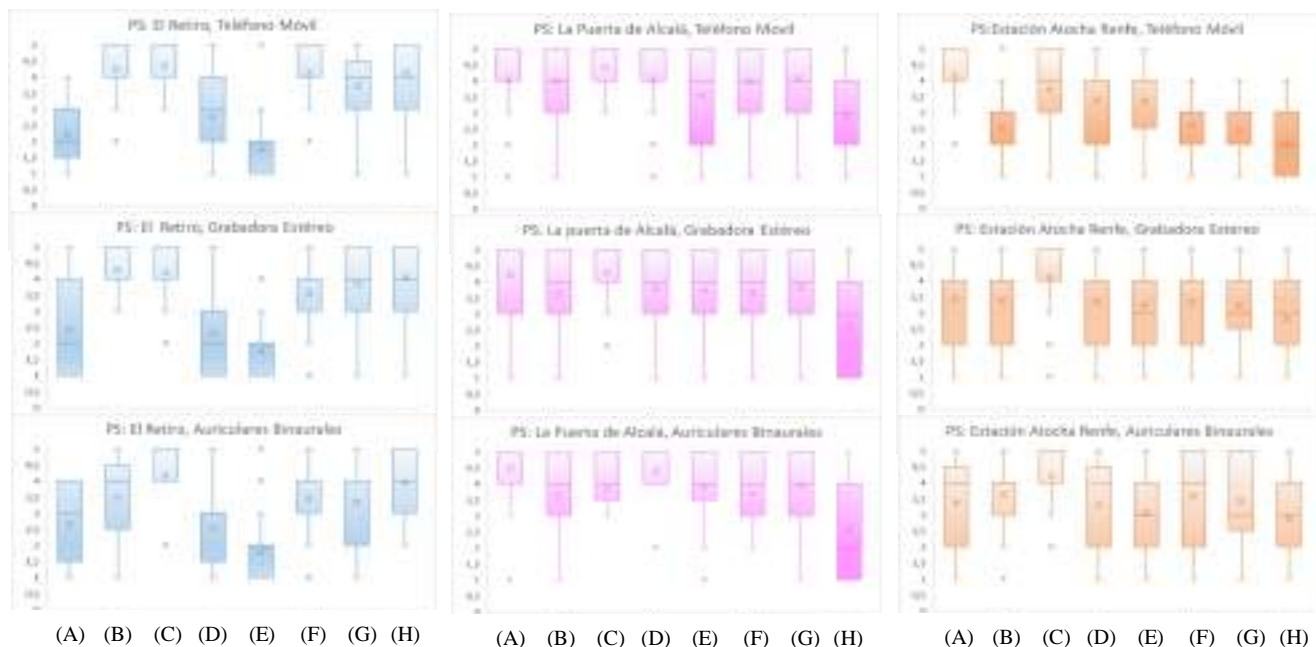


Figura 4. *Boxplots* de los cuestionarios en todos los PS estudiados. Las características presentadas son: (A) Ruidoso, (B) De calidad, (C) Realista, (D) Alto, (E) Desagradable, (F) Definido, (G) Espacial, (H) Agradable.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 29 encuestas válidas. En primer lugar, se realiza un análisis estadístico descriptivo de las respuestas de las encuestas. Además, se aplica la prueba de hipótesis no-paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar los dispositivos, de acuerdo con investigaciones en el análisis de PS en [8]. La Figura 4 presenta una síntesis de los resultados obtenidos mediante diagramas de cajas y bigotes (*boxplot*) de los cuestionarios de los 3 PS evaluados.

El realismo que han aportado los tres dispositivos podría calificarse como notable, destacando el teléfono móvil en PS abiertos y los auriculares binaurales en PS en recintos (PA Atocha Renfe). Se trata de una de las características fundamentales para el objetivo de este experimento, puesto que el realismo se relaciona directamente con la ‘naturalidad’ y ‘fidelidad’ del audio según [22]. Todos los dispositivos ofrecen una calidad notable de sonido para los participantes. Respecto a la calidad del sonido, Gabriellson y Sjören [23] detectaron que para los factores que la condicionan son: claridad, sensación de espacio y cercanía en la reproducción. La Estación de Atocha Renfe es un escenario reverberante, y la calidad del PS se manifiesta más baja que en espacios abiertos. Observando las puntuaciones de todos los dispositivos, la grabadora estéreo y los auriculares binaurales tienen una clara diferencia con respecto al teléfono móvil, dado que dotan de más espacialidad al audio en su toma, siendo los auriculares binaurales el método mejor valorado.

Por el contrario, en los PS abiertos como el Parque El Retiro y la Puerta de Alcalá, el dispositivo que acumula más puntuaciones en estos parámetros, es el teléfono móvil; presentando puntuaciones más altas en calidad, espacialidad o realismo.

Los resultados acerca de cómo de ruidoso es el PS en la Estación Atocha Renfe y La puerta de Alcalá son mayores con respecto al escenario del Parque El Retiro. Esto lleva a deducir que, si el ruido fuera generado por los equipos utilizados, la toma del Parque debería ser la toma con más ruido, ya que, al ser el PS con menor volumen, sería la toma donde mejor se escucharía el ruido introducido por los dispositivos. Al no ser así, se llega a la conclusión de que los participantes relacionaron el parámetro ruido con elementos sonoros molestos. Los PS más ruidosos son los que contienen más elementos sonoros no deseados por los participantes, probablemente.

Los resultados de este estudio están en línea con otras investigaciones previas. Por ejemplo, podemos observar cómo la evaluación del PS reverberante es mucho mejor cuando se realiza con grabaciones que dotan de espacialidad las tomas captadas, como las tomas binaurales o las estereofónicas, al igual que en [2]. El teléfono móvil ha sido el mejor método en PS abiertos pero el peor método en PS reverberantes; donde lideran las puntuaciones los auriculares binaurales.

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis indican que las diferencias entre los métodos de grabación y los parámetros evaluados no son significativas en un

porcentaje elevado de casos y de características, por lo que es independiente el método de grabación con el resultado. Sin embargo, es importante destacar que, en la Estación Atocha Renfe, los parámetros de calidad, definición y espacialidad sí presentan diferencias significativas entre registros monoaurales y binaurales, y por lo tanto el dispositivo puede generar diferencias en la evaluación de PS; de nuevo corroborando las conclusiones de [2].

Durante la realización de las pruebas surgieron varias dudas entre los participantes, muchas de ellas comunes. Se observaron varios patrones que a nuestro juicio deberían descartarse en futuras líneas de investigación. Una de las dudas más recurrentes fue la definición de “ruido”, a lo que respondíamos con una breve descripción: “sonido desagradable, indeseado y dañino.” [1]. Contextualizamos el ruido y lo ejemplificamos para facilitar su entendimiento, pero no siempre quedaba completamente claro. Otro término que resultaba extraño o novedoso a los oyentes era la espacialidad. Acostumbrados a términos como estéreo, pensaban que un audio sólo se podía interpretar desde la izquierda o derecha, desconociendo otros métodos. Para futuras investigaciones concluimos en que una solución a esta situación podría ser la de añadir una introducción inicial ejemplificada y con una espacialidad notable entre audios para que el oyente pueda familiarizarse con el término e interiorizarlo mejor. Muchos de los participantes preguntaron si el cuestionario debía contestarse pensando en si les gustaba el sonido que escuchaban o si este estaba bien grabado. Ante esta duda explicamos que la prueba consistía en comparar los tres sistemas de audio, por lo que preferiblemente deberían evitar sus respuestas más afectivas.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo sugiere que los tres métodos empleados en la captación de PS son válidos, pero hay que tener en cuenta si el PS es reverberante, porque el método seleccionado influirá en la toma. La mayoría de los parámetros utilizados como calidad, realismo o la valoración personal de cada toma han obtenido unos resultados positivos, llegando a obtener una calificación de notable. Estos resultados abren un camino a utilizar herramientas más económicas para la grabación de PS en vez de usar costosos sistemas HATS. Estos métodos o herramientas son de bajo coste, algunos ya integrados en el día a día, como es el caso de un teléfono móvil, teniendo los mejores resultados en PS abiertos. Se trata de medios más accesibles lo que puede favorecer la recolección y el número de datos; de especial relevancia en investigación de PS.

Es relevante poner de manifiesto la falta de familiarización de las personas que participaron en el experimento con la terminología y comprensión del objetivo de la prueba. Los participantes confundían términos como ruido con volumen o con elementos sonoros que no eran de agrado, desconocían conceptos como espacialidad, o no lograban diferenciar el término de calidad con el de su

valoración subjetiva sobre los audios. La evaluación perceptual de los sonidos ambientales es un factor que cobra mucho peso en este ámbito de investigaciones, es importante de cara a plantear nuevos estudios contemplar estos factores desde un primer momento y asegurarse de la preparación de los participantes, y no confiarlo todo a una referencia estandarizada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte y la financiación parcial de esta investigación a los siguientes organismos: Agencia Estatal de Investigación - AEI (proyecto POLIGRAPH, ref. num. PID2022-136887NB-I00), AEI (proyecto SPGRAPH, ref. num. PID2019-105032GB-I00), y Comunidad de Madrid y Universidad Rey Juan Carlos (Proyecto I+D Jóvenes Doctores, AUTO-BA-GRAPH, ref. num. F861).

REFERENCIAS

- [1] Aletta, F., & Xiao, J. (2018). What are the current priorities and challenges for (urban) soundscape research? *Challenges*, 9(1), 16.
- [2] Xu, C., & Kang, J. (2019). Soundscape evaluation: Binaural or monaural? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(5), 3208-3217.
- [3] Rumsey, F. (2012). *Spatial audio*. Taylor & Francis. Boston, USA.
- [4] Begault, D. R. (1990, September). Challenges to the successful implementation of 3-D sound. In *Audio Engineering Society Convention 89*. Audio Engineering Society.
- [5] Møller, H., Sørensen, M. F., Hammershøi, D., & Jensen, C. B. (1995). Head-related transfer functions of human subjects. *Journal of the Audio Engineering Society*, 43(5), 300-321.
- [6] Coensel, B. D., Vanwetswinkel, S., & Botteldooren, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), EL148-EL153.
- [7] Genuit, K., & Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. *Acta acustica united with acustica*, 92(6), 952-958.
- [8] Hermida, L., & Pavón, I. (2019). Spatial aspects in urban soundscapes: Binaural parameters application in the study of soundscapes from Bogotá-Colombia and Brasília-Brazil. *Applied Acoustics*, 145, 420-430.
- [9] Satoh, F., Sakagami, K., & Omoto, A. (2016). Application of a smartphone for introductory teaching of sound environment: Validation of the precision of the devices and examples of students' work. *Acoustical Science and Technology*, 37(4), 165-172.
- [10] Padilla-Ortiz, A. L., & Orduña-Bustamante, F. (2021). Binaural speech intelligibility tests conducted remotely over

the internet compared with tests under controlled laboratory conditions. *Applied Acoustics*, 172, 107574.

[11] Huawei (2019). HUAWEI P smart 2019. <https://consumer.huawei.com/es/phones/p-smart-2019/>

[12] Zoom (2019). Handy Recorder. <https://www.zoom.co.jp/products/handy-recorder/h1-handy-recorder>

[13] Kathleen Chapman. (2019). Hooke Audio Hooke Verse review. <https://the-gadgeteer.com/2019/10/07/hooke-audio-hooke-verse-review/>

[14] Cesva (2022). Cesva SC310. <https://www.cesva.com/es/productos/sonometros/sc310/>.

[15] Creative. (2013). Creative Inspire T3300. <https://es.creative.com/p/speakers/inspire-t3300>

[16] Audacity (2022) Audacity, editor de audio libre. <https://audacity.es/>

[17] ISO/TS 12913-2:2018. Acoustics – Soundscape - Part 2: Data collection and reporting requirements. Geneva, Switzerland.

[18] Axelsson, Ö., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5), 2836-2846.

[19] Bligh, D. A. (1998). *What's the Use of Lectures?*. Intellect books. Exeter, England.

[20] López-Peñalver, I. (2022). *Análisis de Técnicas de Grabación de Paisajes Sonoros*. TFG, Universidad Rey Juan Carlos. Móstoles, España.

[21] López-Roldán, P., & Fachelli, S. (2017). *El diseño de la muestra. Metodología de la investigación social cuantitativa*. Universitat Autònoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallès, España.

[22] Berg, J., & Rumsey, F. (2000, February). In search of the spatial dimensions of reproduced sound: Verbal protocol analysis and cluster analysis of scaled verbal descriptors. In *Audio Engineering Society Convention 108*. Audio Engineering Society.

[23] Gabrielsson, A., & Sjögren, H. (1979). Perceived sound quality of sound-reproducing systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4), 1019-1033.



PAISAJE SONORO Y BIENESTAR SOCIO-ECOLÓGICO EN LAS CIUDADES

Fausto E. Rodríguez Manzo^{1*}

¹Área y Laboratorio de Investigación de Análisis y Diseño Acústico
Ciencia y Artes para el Diseño – Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco,
Ciudad de México

RESUMEN

Ante la necesidad de entender al paisaje sonoro como un elemento nativo de los espacios públicos de las ciudades, se plantea este enfoque que busca relacionar los aspectos acústicos de las ciudades con el bienestar de la población y el impacto que los ecosistemas urbanos tienen en ello. Se presentan los conceptos y se desarrolla el discurso teórico que desemboca en una serie de posibilidades en el ámbito urbano y de la percepción de las personas como ciudadanos. Merece una mención el papel que los sonidos naturales del espacio público, en especial el de las aves, tienen en la percepción del paisaje sonoro como espacios de calidad ambiental, así como diversos elementos urbano-arquitectónicos. Por otro lado se menciona el papel contemporáneo de la planificación urbana donde los aspectos económicos y monetarios superan las decisiones públicas (políticas públicas) que sobre el bienestar de la población se dan, donde la existencia de ambientes sonoros contrarios a la naturaleza propia de los espacios públicos se presentan. El espacio público, que es el espacio entre los edificios de una ciudad, es lo que hace que las ciudades sean consideradas únicas y grandiosas, y en ello el paisaje sonoro juega un papel fundamental.

ABSTRACT

Given the need to understand the soundscape as a native element of the public space of cities, this approach is proposed, which seeks to relate the acoustic aspects of cities with the population well-being and the impact that urban ecosystems have on it. The concepts are presented, and the theoretical discourse is developed that leads to a series of possibilities in the urban environment and the people's perception as citizens. The role that the natural sounds of public space, especially that of birds, have in the perception of the soundscape as spaces of environmental quality, as well as various urban-architectural elements, deserves mention. On the other hand, the contemporary role of urban planning is mentioned where economic and monetary aspects exceed

public decisions (public policies) that take place on the well-being of the population, where the existence of sound environments contrary to the nature of the spaces public are presented. Public space, which is the space between the buildings in a city, is what makes cities being considered unique and great, and in this way the soundscape plays a fundamental role.

Palabras Clave— Paisaje Sonoro, Socio-ecología, espacio público, bienestar humano, ciudad.

1. INTRODUCCIÓN

Este planteamiento pretende trascender la frontera del conocimiento del urbanismo y el espacio público al considerar al paisaje sonoro como un elemento de análisis de las condiciones de bienestar de los ciudadanos desde una perspectiva socio-ecológica. Trasciende la frontera del conocimiento toda vez que para la investigación, estudios y análisis urbano no se contempla al sonido como un ingrediente esencial y determinante que se pueda integrar a cualquier tipo de análisis donde los ciudadanos estén involucrados. De esta forma el paisaje sonoro urbano, que es el conjunto de sonidos que rodea a las personas de manera individual o colectiva puede ser medido, grabado, analizado, cuestionado y encuestado para determinar su contribución a la generación de condiciones de bienestar social y ecológico de los ciudadanos, usuarios del espacio público. Un análisis comparativo del paisaje sonoro urbano y sus efectos en espacios públicos relevantes aportará un conocimiento novedoso al estudio del espacio público en las ciudades. Así se espera que los resultados de este tipo de investigación ayuden a comprender mejor el fenómeno urbano y los beneficios de la consideración del paisaje sonoro como un ingrediente esencial en los estudios de la ciudad.

2. ANTECEDENTES

Uno de los aspectos menos estudiados dentro del urbanismo y los estudios de la ciudad es el aspecto sensorial

* **Autor de contacto:** Fausto E. Rodríguez-Manzo; rfme@azc.uam.mx

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

relacionado con la percepción acústica del espacio público. Hoy en día los estudios de la ciudad se enfocan más en la planificación física, la forma urbana, la sociología urbana, la antropología, la geografía y la historia, así como la restauración urbana y arquitectónica.

El sentido de la vista, que es el que predomina en todas estas líneas de investigación, se apropia del modo de pensar de las y los investigadores dejando de lado una gran posibilidad de encontrar conocimiento a través de otras formas de percibir el espacio público.

El espacio público es sin duda uno de los iconos de investigación de múltiples disciplinas que tienen distintos enfoques que van de lo físico a lo imaginario pasando por lo social primordialmente.

Los espacios públicos son un emblema del carácter urbano de las ciudades. De alguna forma se convierten en el símbolo mismo de las ciudades y en el elemento que califica de alguna manera la grandeza hasta ahora visual de las ciudades.

Ciertamente existe una investigación acerca de los espacios públicos de las principales ciudades del mundo y así se han indagado orígenes, estilos, tipologías, forma urbana y muchas otras cuestiones que generalmente redundan en los aspectos físicos y arquitectónicos.

Un espacio público va mucho más allá de los aspectos turísticos y tipológicos, son generalmente espacios creadores de atmósferas que pueden evocar situaciones de toda índole y lo cual es importante estudiar en beneficio de ellos. Así aspectos como la historia misma, la arquitectura y las diferentes tipologías, su ubicación geográfica, su relación con diversas culturas, con el ambiente natural, con los aspectos sociales y antropológicos, y así sucesivamente. Pero son pocos quienes se han hecho la pregunta sobre de qué forma incide lo sensorial en la percepción de los espacios públicos. Desde luego la vista ha sido hegemónica en ello, pero la percepción auditiva, la escucha, el ambiente sonoro ¿no son importantes en la percepción del espacio público?

3. UNA PROPUESTA DIFERENTE

La propuesta apoya en general la disciplina del urbanismo en cuanto al espacio público, en específico el espacio público. Se trata de una propuesta encaminada a generar conocimiento de frontera integrando al conocimiento y análisis tradicional del urbanismo y del espacio público al paisaje sonoro y a la ecología, la sociología, la tecnología de medición, grabación y análisis del paisaje sonoro, así como la percepción de la calidad de vida y el bienestar de los ciudadanos en el espacio público de las ciudades. Se abordan retos que generen nuevas formas de pensar el urbanismo en beneficio de un conocimiento innovador con respecto a las formas actuales de generación de conocimiento del espacio público.

Esta propuesta se enfoca en el espacio público entendido de manera amplia como un espacio socio-ecológico. Este enfoque implica que los espacios públicos no son solamente espacios físicos, ni espacios ajardinados, sino espacios donde además la ciudadanía está presente, convive, disfruta, se expresa, se manifiesta, realiza actividades culturales, económicas, y se gestiona la cultura social, ecológica y el turismo. La idea central es explorar de que forma la ciudadanía se beneficia o sufre del paisaje sonoro dentro del ambiente socio-ecológico que vive en el espacio público de las ciudades.

El espacio público que puede albergar características socio-ecológicas donde las relaciones del espacio físico, el espacio natural, el espacio social y económico se pueden dar de forma estructural creando una simbiosis que beneficie principalmente a la ciudadanía local y foránea.

En esencia se contempla la observación de la interacción entre los seres humanos, los sistemas sociales y los sistemas naturales que vuelven al espacio público un sistema complejo al considerar los aspectos de interacción social, histórica y de bienestar de la ciudadanía.

Las metodologías que se pueden emplear van desde la investigación documental; la observación de campo, el análisis histórico, el conteo y la medición de elementos urbanos; la investigación y el análisis urbano; la aplicación de técnicas de adquisición de datos como la medición acústica, la grabación de audio bi-aural (ambos sonidos), la grabación de audio ambisónica (tridimensional), la grabación de audio bio-acústica, la grabación de video tridimensional, grabación de video directo y la fotografía; desarrollo y la aplicación de encuestas entre la población en sitio en paralelo con las mediciones y grabaciones; entrevistas a personajes relacionados con los centros históricos de análisis. En el proceso de análisis, interpretación y correlación de datos es relevante utilizar técnicas estadísticas y de cartografía SIG.

Los resultados esperados implican el análisis y la correlación de datos lo que llevará al descubrimiento de las formas de vida pública de los espacios públicos analizados, el detalle de la forma en que el paisaje sonoro beneficia el bienestar y la salud de la ciudadanía. Esto puede expresarse en reportes específicos por espacio público y de conjunto, así como en cartografía socio-acústica-ecológica en formato SIG, que en mucho puede brindar información novedosa a nivel gráfico e interactivo.

4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Es el paisaje sonoro del espacio público urbano un ingrediente primordial en el estudio del bienestar socio-ecológico de la ciudadanía?

¿Cuáles son las variables que distinguen el estudio del bienestar socio-ecológico del ciudadano en el espacio público de las ciudades?

6. EL PAISAJE SONORO

- ¿Contribuye la ecología y la bio-acústica al bienestar ciudadano en el espacio público de las ciudades?
- ¿Es el espacio público de las ciudades una arena que propicia el bienestar y salud socio-ecológica de la población?
- En esta época de globalización y de ciudades genéricas ¿tiene el paisaje sonoro del espacio público relevancia y significado para la ciudadanía?
- ¿Acaso el paisaje sonoro del espacio público contribuye a la percepción de la ciudadanía de la calidad de dichos espacios en materia ambiental, de oportunidades de descanso y recreo, de protección y seguridad, de aislamiento del tráfico vehicular, de lugar de interacción social, intercambio económico y expresión cultural?
- ¿Es el paisaje sonoro urbano del espacio público un indicador de la transición histórica y socio-ecológica de las ciudades?
- ¿Es el paisaje sonoro urbano un vehículo y vía para la sostenibilidad y sustentabilidad de los centros históricos en México?

5. ¿EN QUÉ CONSISTE EL CONOCIMIENTO NOVEDOSO?

En la combinación de variables no tradicionales de análisis urbano que en esta propuesta abarcan aspectos arquitectónicos y urbanos, sociológicos, ecológicos y biológicos, psicológicos y sonoros. Todos para generar una línea de investigación transdisciplinar.

Existen por supuesto de manera desagregada estudios del paisaje sonoro desde diversas ópticas como la acústica física, la biología, la sociología y la antropología, la historia, la filosofía, el arte y desde luego la arquitectura, el urbanismo y el diseño. Sin embargo, la óptica de esta propuesta es integral y considera trascender los límites de cada una de las disciplinas mencionadas.

Se tiene de esta forma la posibilidad de generación de conocimiento nuevo que trascenderá también las fronteras de la investigación tradicional a nivel internacional. Un cambio de paradigma de lo interdisciplinar a lo transdisciplinario, es decir holístico.

El reto de la propuesta es demostrar que el paisaje sonoro urbano es un elemento esencial para el estudio del espacio público de la ciudad y del bienestar socio-ecológico de la ciudadanía.

A fines de la década de 1960 se creó el World Soundscape Project (WSP) por R. Murray Schafer y un grupo de investigadores y educadores en la Universidad Simon Fraser de Vancouver, Canadá (WSP, revisado 2022). El objetivo era llamar la atención sobre el entorno sonoro y el surgimiento de la contaminación acústica, en especial por los sonidos molestos que estaban cambiando el ambiente sonoro de Vancouver. Entre otras cosas promovía un enfoque positivo en oposición al enfoque negativo que inevitablemente surgía del concepto de la contaminación acústica y apreciar de alguna forma los sonidos del medio ambiente como música. En 1977 aparece la publicación icónica de R. Murray Schafer “The Soundscape. Our Sonic environment and the tuning of the world”, publicación que sigue vigente al continuar influyendo las distintas corrientes científicas, artísticas y humanísticas que han ido surgiendo en torno al concepto.

En 1987 Bernard Krause publica “BIO-ACOUSTICS Habitat ambiente & ecological balance”, lo que supone el surgimiento de la Bio-Acústica que promueve la preservación de los sonidos de la fauna y la naturaleza. Entre otras situaciones plantea que los sonidos del ambiente biológico son hoy casi inexistentes debido a la oscuridad que genera el enmascaramiento de los sonidos generados por los seres humanos.

Surge en 1993 el World Forum for Acoustic Ecology (WFAE) (Foro Mundial de Ecología Acústica) en Banf, Canadá como una organización que reúne los esfuerzos del WSP y de la Bio-Acústica. La visión de esta organización, a la que México pertenece y tiene una representación en la Red Ecología Acústica México (REA_Mx) desde 2022, es: “Una asociación internacional de organizaciones afiliadas e individuos que comparten una preocupación común por el estado de los paisajes sonoros del mundo. Nuestros miembros representan un espectro multidisciplinario de personas involucradas en el estudio de los aspectos sociales, estéticos, culturales y ecológicos del entorno sonoro.”

Hoy en día, el interés por la Ecología Acústica ha ido creciendo y cuenta con representantes de Europa, Asia-Pacífico, Sur/Central, América desde 1998. Entre otras situaciones el WFAE promueve los valores de la Ecología Acústica de escuchar y reconocer la calidad del paisaje sonoro dentro de un entorno que se sabe es cada día más ruidoso. (WFAE, revisado 2022).

Por otro lado, existe la preocupación por el ruido ambiental o contaminación acústica donde en diversos países del mundo existen acciones encaminadas a mitigar sus efectos. Así por ejemplo la directiva europea surgida en 2002, denominada “Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental” (EUR-Lex, revisado 2022), con el objeto de coordinar esfuerzos en la Unión Europea para reducir esta carga en la vida cotidiana de millones de

ciudadanos, en este caso europeos, para establecer un enfoque común para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos de la exposición al ruido ambiental.

Ciertamente esta es una visión negativa del ambiente sonoro de las ciudades y la forma en que normalmente se combate es reduciendo los niveles sonoros hasta alcanzar los niveles apropiados que la Organización Mundial de la Salud que ha establecido que se encuentren por debajo de los 70 dBA para proteger la audición y menor a 45 dBA para conciliar y proteger las posibles afectaciones al sueño.

El autor de esta propuesta coordinó entre 2009 y 2011 los trabajos para la realización del Primer Mapa de Ruido para la ZMVM (Rodríguez, F.E, y E. Garay, 2012; Excelsior, 2014), basado en la información que sobre el tráfico vehicular existía, dado que se trata de la fuente de ruido y contaminación acústica de mayor impacto en la población. De este ejercicio, importante sin duda, se aprendió que los mapas de ruido, aunque importantes brindan una información que es mucho más útil para las autoridades y gestores de la contaminación acústica que a la población, y que los mapas de gran escala como este que se realizó que quizá sea el más grande desarrollado hasta la fecha son poco útiles para el monitoreo de comunidades medianas y menores como es el caso de los centros históricos de las ciudades.

Posteriormente en 2014, el autor de esta propuesta obtuvo el beneficio del proyecto de Ciencia Básica “El ruido ambiental en el espacio urbano de la CDMX. Problemas y modelos de solución” de CONACYT, proyecto que fue concluido y aprobado en 2020. De este proyecto se aprendieron aspectos importantes como el hecho de que la población no es consciente de la contaminación acústica y tampoco está informada al respecto, solo al pedir su opinión expresa incomodidades, pero no está consciente del daño fisiológico y psicológico que el ruido le puede hacer. (Rodríguez, F.E. et al, 2020)

En esa investigación se fueron reduciendo las áreas de análisis y de esta forma se creó una cartografía que, aunque encaminada a mostrar el efecto de los niveles de ruido ambiental, reclamaban la posibilidad de mostrar el ambiente sonoro o mejor dicho el paisaje sonoro de las distintas áreas de estudio.

Así es como posterior a este proyecto el autor se enfoca mayormente en el estudio del paisaje sonoro sobre el ambiente urbano de las ciudades y realiza contacto con el grupo de investigación del Bartlett UCL Institute for Environmental Design and Engineering del University College of London que realiza estudios del paisaje sonoro urbano en busca de nuevos índices que vayan más allá de los niveles sonoros, mismos que no conllevan en si ninguna información cualitativa.

De esta forma se adoptan metodologías de medición y grabación con objeto de registrar el paisaje sonoro del espacio público desarrolladas por este grupo. (Mitchell, A. et al., 2019), mismas que se han estado aplicando y

adecuando a las condiciones en el espacio público en México.

Por otro lado, con la creación del Mapa de Ruido de la ZMVM se tiene la experiencia suficiente para el manejo de cartografía acústica y ahora se plantea la necesidad de trascender generando una cartografía socio-acústico-ecológica que permita dar un panorama más profundo de lo que los ambientes acústicos de la ciudad representan para la ciudadanía en los espacios públicos en centros históricos de México.

Las normas ISO 12913 – 1, 2 y 3 que por título genérico llevan el de Acoustics – Soundscape, dedicada la primera parte a la definición y marco conceptual, la segunda parte a la recopilación de datos y requisitos de presentación de informes, y la tercera parte al análisis de los datos. De esta forma se cuenta con una guía metodológica que es totalmente aplicable a esta propuesta y sirve de guía a otras instituciones entre ellas el University College of London y la Universidad Austral de Chile, instituciones ambas con las cuales se ha intentado vincular académicamente para un enriquecimiento mutuo.

6. DE LA ECOLOGÍA ACÚSTICA Y LA BIO-ACÚSTICA

Como el WFAE referido arriba la describe, la Ecología Acústica se enfoca en el estudio de los aspectos sociales, estéticos, culturales y ecológicos del entorno sonoro, y esto aplica por supuesto al espacio público. Sin embargo, encontramos por otro lado la ecología acústica con una base bio-acústica. Hoy se puede considerar todavía que existen zonas naturales intactas, además de los asentamientos rurales y de los asentamientos urbanos. Así las zonas naturales intactas están conformadas por geofonías y biofonías, los asentamientos rurales por geofonías, biofonías y una baja intervención de antropofonías, pero en los asentamientos urbanos que quedan conformados por los tres también, la presencia de las antropofonías supera por mucho la de las otras dos, enmascarando dichos sonidos y afectando en el caso de las biofonías algunas comunidades de especies animales.

Una cuarta clasificación propuesta por el autor son las Urbanofonías (Tabla 1) es decir el efecto que la ciudad ejerce sobre el ambiente sonoro de la ciudad, considerando la combinación de los niveles de las fuentes sonoras y las secuelas que las reflexiones, absorciones y difusiones dejan en un espacio determinado, esto implica que la combinación de sonidos afectados por las interacciones con el espacio urbano. De esta forma se conjuntan sonidos y efectos que pueden tener un impacto en la percepción del espacio público, de la ciudadanía.

7. El urbanismo y el espacio público

	Geofonías	Biofonías	Antropofonías	Urbanofonías
Geofonías	Sonidos de los elementos naturales inertes	Sonidos que originan o alteran, modifican	Sonidos que agravan, atenuan, fusionamos, claman, o alteran, pueden manifestarse	Silbidos, repiquetes y golpes, ruidos, sonidos de fondo, ruidos sonoros, silbidos, y efectos simplificados y reverberantes, sintonías-sonos, algunos silbidos y aletas
Biofonías	Sonidos compartidos de la naturaleza	Sonidos de los seres vivos	Complejidad agradable, sonidos enmascarados	Ambientes naturales y experimentos biofonos con efectos, simplificaciones y reverberaciones
Antropofonías	Complejidad sonora, musicalización ambiental	Complejidad sonora, musicalización ambiental	Sonidos creados por el ser humano	Ambientes agradables, ambientes de fondo, ruidos, efectos sonoros, sonidos simplificados y reverberantes
Urbanofonías	Amplificación de sonidos naturales, efectos sonoros y reverberaciones	Temas musicales, simplificación de sonidos naturales, reverberaciones	Temas musicales, simplificación de sonidos electrónicos o de música, reverberaciones, ruidos	Sonidos que se experimentan a través de la ciudad, expresión resultante de la interacción con la configuración física de la ciudad

Tabla 1. Correlación de fuentes sonoras de acuerdo con su categoría. Paisaje Sonoro Ecológico (Rodríguez, F. E., 2017)

Almo Farina (Farina, A., 2014:10) ilustra claramente esta situación en su libro *Soundscape Ecology*, y en él se describe el papel de cada una de las fuentes sonoras ecológicas: geofonías, biofonías, antropofonías. En mi libro *Ruido y Ciudad* (Rodríguez, F.E., 2017:75), a partir de lo expuesto por Farina, resumo la relación que existe entre cada una de ellas y con cada una de ellas, proponiendo una cuarta categoría que he denominado Urbanofonías y que son precisamente los sonidos que se escuchan en el espacio público de la ciudad y muy probablemente en los Centros Históricos. (Tabla 1).

Se puede ubicar a la bio-acústica en el campo de la ecología urbana donde en la preocupación por la urbanización constante del planeta y el crecimiento constante de las ciudades queda enmarcada la preocupación por la diversidad biológica ya que se considera que las ciudades son ecosistemas heterotróficos, pues los organismos vivos no pueden crear alimento de los elementos inertes de la ciudad y por tanto tienden a desaparecer.

Por otro lado, la bio-acústica ha estado siempre preocupada por los sonidos de origen antropogénico ya que de la misma forma a la alimentación esos sonidos tienden a enmascarar los sonidos propios de la fauna, como en el caso de las aves canoras que en muchos casos adaptan sus cantos a las condiciones del paisaje sonoro urbano, en particular por efecto del ruido ambiental excesivo. En otros casos los cantos llegan a desaparecer. (Bermúdez, E. et al., 2010, 2018)

Como tema central de esta propuesta, el espacio público se erige como el objeto beneficiado del proyecto en conjunción con los espacios públicos. Existen varios enfoques en la literatura con respecto al concepto de espacio público, desde el que acude al diseño urbano donde los componentes físicos, la forma urbana y la planeación de ciudades es el paradigma hasta el matemático y estadístico que se relaciona mayormente con la planificación y proporciona datos fundamentalmente cuantitativos o el enfoque hipertecnológico que acude a las simulaciones por computadora y los modelos matemáticos que surgen de la ciencia de las ciudades. En medio de estos dos extremos se encuentra la visión social, la visión antropológica, la visión ecológica y la visión humana del espacio público.

Esta propuesta congenia más con los conceptos teóricos del Derecho a la Ciudad y del de La Producción del Espacio de Henri Lefebvre (1968, 1974), en tanto entendiendo el espacio público como un espacio para todos y para todas las manifestaciones y actividades, alejado de una visión donde el pulpo inmobiliario lo distorsiona y lo convierte en un espacio-negocio para unos cuantos sin beneficio para las mayorías, que aleja por mucho el concepto de ciudadanía que debiera ser preponderante en las ciudades. Así también se plantea como eje teórico el de la ciudadanía planteado por Jordi Borja así como el de Néstor García Canclini y los imaginarios urbanos de Armando Silva (2006), García Canclini (2007), Daniel Hiernaux (2020), Adolfo B. Narváez (2013) y Eloy Méndez (2013).

Como tema central de esta propuesta, el espacio público se erige como el objeto beneficiado del proyecto en conjunción con los centros históricos. Existen varios enfoques en la literatura con respecto al concepto de espacio público, desde el que acude al diseño urbano donde los componentes físicos, la forma urbana y la planeación de ciudades es el paradigma hasta el matemático y estadístico que se relaciona mayormente con la planificación y proporciona datos fundamentalmente cuantitativos o el enfoque hipertecnológico que acude a las simulaciones por computadora y los modelos matemáticos que surgen de la ciencia de las ciudades. En medio de estos dos extremos se encuentra la visión social, la visión antropológica, la visión ecológica y la visión humana del espacio público.

Esta propuesta congenia más con los conceptos teóricos del Derecho a la Ciudad y del de La Producción del Espacio de Henri Lefebvre (1968, 1974), en tanto entendiendo el espacio público como un espacio para todos y para todas las manifestaciones y actividades, alejado de una visión donde el pulpo inmobiliario lo distorsiona y lo convierte en un espacio-negocio para unos cuantos sin beneficio para las mayorías, que aleja por mucho el concepto de ciudadanía que debiera ser preponderante en las ciudades. Así también se plantea como eje teórico el de la ciudadanía planteado por Jordi Borja así como el de Néstor García Canclini y los

imaginarios urbanos de Armando Silva (2006), García Canclini (2007), Daniel Hiernaux (2020), Adolfo B. Narváez (2013) y Eloy Méndez (2013).

8. Conclusiones

En resumen, la propuesta aquí planteada busca una humanización en la investigación del ambiente sonoro del espacio público de las ciudades. Es decir, el enfoque social y ecológico de los ambientes sonoros de la ciudad.

Todas y todos los seres humanos que tratamos de utilizar, disfrutar y gozar del espacio público en las ciudades, estamos sujetos al impacto del ambiente sonoro el cual puede ir de un ambiente amable, afectivo y confortable, a un ambiente de emisiones sonoras que pueden afectar el bienestar y la salud de la población.

El enfoque socio-ecológico del paisaje sonoro da una orientación poco usual en el estudio del paisaje sonoro de la ciudad. Hoy este enfoque es primordial ya que considera tanto los aspectos humanos como los aspectos ecológicos de espacio público.

Finalmente la idea es que este enfoque tenga un impacto en la forma en que nosotros los acústicos del mundo manejemos los ambientes sonoros de la ciudad, más allá de los niveles sonoros en dBA o las clasificaciones provenientes de tablas preconcebidas o resultado de planteamientos de la forma en que ciertas tipologías de niveles sonoros afectan a la población.

Es indispensable entender los paisajes sonoros de nuestros espacios públicos desde la óptica socio-ecológica para una gestión y conservación de los espacios públicos del mundo.

- Lhasa. Environment and Planning B: Planning and Design. Sage Publications. London, GB
- LADAc-SMAGDF (2011) <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/456>
- Lefebvre, H. (1968) El Derecho a la Ciudad. Capitán Swing. Madrid, España
- Lefebvre, H. (1974) La producción del espacio. Capitán Swing. Madrid, España
- Méndez, E. (2013) Turismo e imaginarios. El Colegio de Sonora
- Narváez, A. (2013). La construcción imaginaria de la ciudad. UANL
- Rodríguez, F.E. (2013). Espacio, sonido y arquitectura. Limusa. México
- Rodríguez, F.E. (2017). Ruido y Ciudad. UAM-Azcapotzalco. México
- Schafer, R. M. (1977). The Soundscape. Destiny Books. Rochester, VT. EUA
- Silva, A. (2006). Imaginarios Urbanos. Arango Editores. Bogotá, Colombia

9. REFERENCIAS

- Bartalucci, Ch. y S. Luzzi (2020). The soundscape in cultural heritage. HERITECH 2020, IOP Publishing. Londres, GB.
- Bermúdez, E. et al. (2010). Experimental evidence for real-time song frequency shift in response to urban noise in a passerine bird. Biol. Lett. 7, 36-38.
- Bermúdez, E. et al. (2018). The role of singing style in song adjustments to fluctuating sound conditions: A comparative study on Mexican birds. Behavioural Processes. Elsevier
- Borja, J. (2003) Espacio público, ciudad y ciudadanía. Electa Farina, A. (2014). Soundscape Ecology. Springer.
- Holanda García, N. (2007). ¿Qué son los imaginarios urbanos? Revista eure Revista eure (Vol. XXXIII, N° 99), Santiago de Chile.
- Gehl, J. (2014). Ciudades para la Gente. Ediciones Infinito. Buenos Aires, Argentina
- Hiernaux, D. (2020). Los imaginarios sociales y el turismo. UP. México
- Huang, L. y J. Kang (2015) The sound environment and soundscape preservation in historic city centres—the case study of

RESULTADOS DEL PASEO SONORO CON EL MÉTODO DAUMAL REALIZADO EN EL TECNIACÚSTICA 2022. EL PAISAJE SONORO DE LA DAMA DE ELCHE

*Francesc Daumal i Domènech¹, Jerónimo Vida Manzano²
Miguel Ausejo Prieto³, Sergio Herguedas Campesino⁴*

¹ ETSAB (UPC-BarcelonaTech), Barcelona, España, ² Universidad de Granada, Granada, España
³ Eurocontrol, Madrid, España, ⁴ HEAD acoustics, Barcelona, España

RESUMEN

En el 53º Congreso Español de Acústica “Tecniacústica 2022”, presentamos la comunicación “Protocolos del Método Daumal y Método ISO 12913 para la Prospección del Paisaje Sonoro de Elche. ¿Qué escucha la Dama de Elche?”, que fue la antesala para la realización de los dos paseos sonoros por dicha ciudad. Estos paseos, destinados a la concienciación de la población sobre la importancia del ambiente acústico, se llevaron a cabo el día 3 de octubre del mismo año, en paralelo a la realización del congreso.

El itinerario, realizado a pie (sin verlo durante unos 30 minutos), fue diseñado siguiendo un recorrido prefijado, con el objetivo de incluir lugares significativos de la ciudad de Elche, tanto por su acústica como por su configuración arquitectónica y urbanística, así como por las características de uso por parte de la ciudadanía. Se tomaron medidas sonométricas en cada lugar por técnicos de HEAD acoustics, Ingeniería García-Calderón y Sound of Numbers, y al finalizar el acto se realizaron encuestas a los participantes para obtener su evaluación subjetiva.

Se exponen ahora los resultados de la experiencia de los recorridos de mañana y tarde del método Daumal, en los que participaron muchos voluntarios y donde las conclusiones permiten augurar buenos resultados cara a la realización de próximos paseos.

ABSTRACT

At the 53rd Spanish Congress of Acoustics "Tecniacústica 2022", we presented the communication "Protocols of the Daumal Method and ISO 12913 Method for the Prospecting of the Soundscape of Elche. What does the Lady of Elche listen to?", which was the prelude to the realization of the two sound walks through said city. These walks, aimed at raising awareness among the population about the importance of the acoustic environment, were held on October 3 of the same year, parallel to the congress.

The itinerary, carried out on foot (without seeing it for about 30 minutes), was designed following a predetermined route, with the aim of including significant places in the city of Elche, both for its acoustics and for its

architectural and urban configuration, as well as for its the characteristics of use by citizens. Sonometric measurements were taken in each place by technicians from HEAD acoustics, García-Calderón Engineering and Sound of Numbers, and at the end of the event, surveys were carried out on the participants to obtain their subjective evaluation.

The results of the experience of the morning and afternoon walks of the Daumal method are now exposed, in which many volunteers participated and where the conclusions allow us to predict good results for future walks.

Palabras Clave— paisaje sonoro, paseos sonoros, método Daumal, patrimonio cultural inmaterial sonoro, sonidos ciudad.

1. INTRODUCCIÓN

En el Tecniacústica 2022 presentamos la comunicación de los protocolos para preparar los paseos por Elche, que luego realizamos, mediante los dos métodos; el Método ISO 12913 dirigido por Jerónimo Vida, y el Método Daumal dirigido por Francesc Daumal. (Figura 1). Ambos métodos, constituyen unos estudios Psicoacústicos en los que participaron varias Universidades Españolas (Universidad Miguel Hernández (UMH), Universidad de Granada (UG), y Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), el propio Ayuntamiento de Elche, y la supervisión de la Sociedad Española de Acústica (SEA).



Figura 1. Daumal, Vida y Herguedas en la comunicación de presentación previa de los paseos. Fotografía Tecniacústica 2022.

La finalidad de ambos métodos es conocer la relación entre el paisaje sonoro de Elche y sus ciudadanos, para concienciar a los participantes sobre la importancia de los sonidos de la ciudad, y contribuir con ello a su educación ambiental. En ambos casos, se realizó un recorrido único -dinámico por las calles y más estático por las plazas- coordinado con la imprescindible participación de Miguel Ausejo Prieto (SEA, Eurocontrol), y Sergio Herguedas (HEAD acoustics).

En nuestra prospección inicial, nos acompañó también Ramón Peral Orts, de la UMH, quién nos mostró algunas alternativas al itinerario, como el sector del Ayuntamiento y del río Vinalopó. La experiencia fue apoyada por el Ayuntamiento de Elche, contando con la presencia de D^a Esther Díez Valero, concejala de Movilidad, Tráfico y Medio Ambiente, quien también participó recorriendo con los ojos vendados un pequeño tramo acompañada por Miguel Ausejo, y contó con la extraordinaria participación de los voluntarios, todos ellos estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de dicha universidad, que realizaron a la perfección las funciones de *lazarillo* en el Método Daumal, mereciendo un gran reconocimiento por parte de los participantes.

La mayor parte de los asistentes procedían de los propios inscritos al congreso, por lo que las respuestas a las encuestas específicas de ambos métodos, son más significativas dada su experiencia en el campo de la acústica.

El paseo del Método Daumal que ahora se expone, ha sido seguido por 28 asistentes en total, (*lazarillos* incluidos), repartidos casi por igual en los grupos de mañanas y tardes, al que dieron asistencia técnica (tanto humana como material) las empresas de HEAD acoustics, Ingeniería García-Calderón, y Sound of Numbers.

2. EL MÉTODO DAUMAL

Como se ha expuesto en otras comunicaciones, el Método Daumal consiste en que un equipo de tres personas (*ciego*, *lazarillo*, *notario*) realizan un itinerario sonoro prefijado por la ciudad, recorrido de forma dinámica y estática.

En una reunión previa, se enseñan a los *lazarillos* y participantes las bases pedagógicas, los objetivos, la metodología específica y el equipo material necesario. Se realiza una prueba inicial donde el Profesor Daumal muestra los distintos estadios del proceso. Con ello se intenta establecer unas relaciones de gran confianza entre los tres intervinientes de cada equipo, que de forma alternativa realizarán los papeles de *ciego*, *lazarillo* y *notario*. Luego se hace el recorrido exterior guiado por el Profesor, y al final, cada participante debe evaluar individualmente su experiencia.

Obviamente aparecen las características acústico-espaciales del sector de la ciudad recorrido por cada uno ellos, donde se aprecian los más ruidosos y calmados, los más señoriales, incluso los más nobles, y se contrastan con las sensaciones exclusivamente auditivas, que hacen que la

vivencia de la ciudad haya sido distinta a la simple percepción visual con que cotidianamente la contemplamos. Se descubren así lugares vacíos de sonidos o con exceso de ruidos, donde se debería rehabilitar la ciudad para que tenga las voces oportunas, y otros con un patrimonio cultural inmaterial sonoro de gran riqueza, que precisaría ser conservado y catalogado como tal.

3. PROTOCOLOS DEL MÉTODO DAUMAL

3.1. Protocolos generales de los participantes

Es primordial que los participantes lleven una venda personal que impida totalmente la visión, pero que no tape ni deforme los oídos. Para el paseo sonoro en Elche, con la participación de los *lazarillos* voluntarios, los inscritos hacen solamente el rol de *ciego* y de *notario*/auditor -alternativamente- en dos sectores del itinerario sonoro propuesto. Esto simplifica la extensión temporal del recorrido total.

3.2. Protocolo del lazarillo

El *lazarillo*/guía, juega un papel fundamental en el Paseo Sonoro del Método Daumal, puesto que es el responsable de guiar a la persona vendada que acompaña, garantizar su seguridad, y supervisar los documentos a entregar.

Gracias a las gestiones de Ramón Peral y la UCLM, contamos con numerosos voluntarios, estudiantes de grado y doctorado, para realizar esta función. En una reunión previa, se le muestra al *lazarillo* que su función es seguir un itinerario preestablecido, guiando al *ciego* y principalmente proporcionándole tranquilidad. Comprueba que la persona que hará de *ciego* se coloca bien la venda, y que esta no obstruye ni deforma las orejas. Enseña al *ciego* a cogerse de su hombro o antebrazo, y anda unos pasos de prueba del *ciego*. Es el *ciego* quién se coge del *lazarillo*. Anda lentamente, sin prisa (sobre unos 3 Km/h), para que el *ciego* pueda seguir sin temor. Tranquiliza al *ciego* sin movimientos bruscos. En una ciudad hay que cruzar calles donde circulan vehículos, por lo que elige siempre pasos semaforizados. Anda un poco adelantado respecto al *ciego*, para que este pueda notar si se bajan o suben peldaños. Trata de buscar lugares que sean contrastados y donde el *ciego* pueda describir diferentes ambientes, interiores-exteriores, ruidosos-silenciosos, estáticos-dinámicos, estrechos-amplios, abiertos-cerrados, calles-plazas, cóncavos-convexos, lúdicos-fabriles,... para que los pueda adjetivar sonoramente. Dentro del itinerario propuesto, elige los soportales donde pasar, las tiendas a las que entrar, y cuando así se establece, se puede parar (Estación) para que el *ciego* experimente de forma más reflexiva ese lugar.

En resumen, no solo acompaña al *ciego*, sino que dirige el grupo asignado siguiendo el itinerario, y complementando la experiencia, si procede, con sonometrías, registros sonoros, vídeos y/o fotografías.

3.3. Protocolo específico del ciego

El *ciego* se coloca la venda personal, se coge del hombro o del antebrazo del *lazarillo* designado y (detrás de él), realiza unos pasos de adaptación durante unos cinco minutos, siempre guiado por este.

Debe confiar ciegamente en su *lazarillo*. Nunca debe ir solo. En caso de pánico se detiene y calma, y en caso extremo se quita la venda.

En el recorrido de tramos dinámicos y paradas, va comentando las percepciones sonoras, intentando explicar con la máxima precisión las características de los espacios del recorrido, adjetivando sobre el sonido de los mismos y las características de las fuentes sonoras.

Para ello dispone de los **adjetivos** usuales como: *tranquilo, calmado, cálido, frío, fabril, bullicioso, estático, irritante, estrecho, ancho, dinámico, alto, bajo, lúdico, infantil, sólido, reverberante, irritante, silencioso*, y todos los que se le ocurran. También debe intentar definir los **materiales** de los pavimentos, fachadas, vuelos y soportales, mobiliario urbano, y su dinámica, ritmos y/o variaciones, así como los aspectos topográficos -subidas, estrechamientos- y cambios en las morfologías y texturas de la ciudad.

Las instrucciones son que proporcione al *notario* la máxima información sobre lo que percibe sin la visión. Especialmente el *ciego* se centrará en apreciar si existen lugares o actividades que por su sonido crea que pueden considerarse catalogables como Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad.

En las estaciones de cambio el *ciego* escucha en silencio unos minutos, y luego contesta la encuesta específica que le hace el *notario* en ese lugar.

3.4. Protocolo específico del notario-auditor

El *notario* o auditor es el que realiza el mayor trabajo. Colocado al otro lado del *ciego*, anota en la hoja de ruta las características espaciales y acústicas del lugar tal como las describe el *ciego*, y levanta acta de todo lo que ocurre, ve y escucha, tanto el *ciego* como la realidad (lugar, hora, tipo de espacio, sensación sonora). También ayuda realizando dibujos, fotografías y/o vídeos. Tiene el papel de auditor, tanto en el sentido en su papel de escuchar, como de la veracidad de lo que dice percibir el *ciego*. El *notario* y el *lazarillo* deben conseguir que el *ciego* escuche el ambiente y diga lo que perciba, para que el *notario* lo anote en la hoja de ruta, y verifique lo que cree haber escuchado. Si el *ciego* no dice nada, le incitan a responder. Preguntan sobre el espacio; si es una calle o una plaza, qué hay en el techo, si el sonido es perimetral o central, actividad o juegos de niños, cambio de pavimento, o de fachada, etc. Al finalizar el tramo del recorrido, ayuda a la realización de las encuestas, y la entrega a la organización con la hoja de ruta.

4. ITINERARIOS

4.1. La hoja de ruta

La hoja de ruta y el cuestionario, cumplimentados por la persona que realiza la escucha activa con los ojos

vendados, los rellena el *notario*. Contiene el recorrido final realizado (representado en la figura 2).

Los valores $L_{Aeq,T}$, $L_{AF5,T}$ y $L_{AF95,T}$ que ha tomado HEAD acoustics en todas las estaciones del recorrido, se marcan en la tabla 1. Se ha obtenido un valor medio de 67 dBA para el $L_{Aeq,T}$, y de 71 y 53 dBA para $L_{AF5,T}$ y $L_{AF95,T}$, respectivamente.



Figura 2. Itinerario del paseo sonoro en Elche, con los valores de los niveles medidos por HEAD-acoustics

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8
$L_{Aeq,T}$	69,03	72,95	65,23	68,62	71,21	64,36	51,40	70,02
$L_{AF95,T}$	60,37	66,52	62,37	56,88	60,78	56,62	46,67	66,46
$L_{AF5,T}$	74,71	78,11	68,41	74,24	74,19	67,70	55,39	73,65

Tabla 1. Valores $L_{Aeq,T}$, $L_{AF5,T}$ y $L_{AF95,T}$ en cada punto

5. DESARROLLO DEL PASEO SONORO

Queremos agradecer expresamente a Miguel Ausejo (SEA y Eurocontrol), sus eficaces gestiones, puesto que en breve tiempo consiguió preparar los dossiers con las hojas de ruta y encuestas para el paseo, las vendas y material para anotar, organizó la logística de los dos eventos y nos entregó el listado inicial de inscritos.

Los asistentes asumieron por el hecho de inscribirse la renuncia del derecho de imagen, consintiendo a aparecer en el material gráfico o sonoro de este paseo, tanto en su preparación, realización y postproducción. A su vez declinaron realizar reclamaciones por cuanto pudiera suceder durante el transcurso del paseo, y por último, que en ningún documento de entrevista/encuesta constarán los apellidos del participante.

Obviamente, en el momento del inicio, se anularon y añadieron otras personas, totalizando 15 (*lazarillos* incluidos) para el grupo de mañanas que realizó el tramo M1 y M2, y otros 15 (es decir cinco grupos también con los *lazarillos* incluidos) para la tarde (grupos T1 y T2).

5.1. Mañanas grupo M1

Este grupo recorrió el itinerario desde el inicio (Centro de Congresos Ciutat d'Elx) hasta el parc de Calaforra, donde se hizo el cambio entre *ciego* y *notario*. Al parecer, el *lazarillo* del grupo de Lazzio decidió comenzar prematuramente, pero el resto de equipos siguió de forma bastante ordenada como vemos en las figuras 3 a 5.



Figura 3. Un momento del inicio del recorrido M1. Las sonrisas no desaparecieron en todo el itinerario. Fotografía TECNIACÚSTICA 2022



Figura 4. Los equipos humanos y materiales desplegados, fueron de una calidad excepcional. Fotografía TECNIACÚSTICA 2022



Figura 5. Algunos participantes en la calle Almorida (ya peatonal). Fotografía TECNIACÚSTICA 2022

Los niveles equivalentes obtenidos se sitúan entre los 65 dBA (plaza Glorieta) y 73 dBA (Almórida/Hospital), los $L_{AF5, T}$ de los mismos lugares, entre 68 y 78 dBA, y los $L_{AF95, T}$ entre 62 y 66 dBA.

5.2. Mañanas grupo M2

En el Parc de Calahorra, realizamos el cambio entre el grupo M1 y M2. Esther Díez, acompañada por Miguel Ausejo, también intervino (hasta el palmeral), y reconoció los retranqueos de la calle Fatxo (Figura 6).



Figura 6. La calle Fatxo. Fuente: Google

Miguel Ausejo, acompañado por Daumal, hizo de ciego un pequeño tramo entre el palmeral y la estación de trenes, reconociendo la tranquilidad de la zona y la presencia de sonidos naturales.

En este segundo tramo, los niveles equivalentes obtenidos se sitúan entre los 51 dBA (El Palmeral) y 71 dBA (Diagonal del Palau), los $L_{AF5, T}$ de los mismos lugares, entre 55 y 74 dBA, y los $L_{AF95, T}$ entre 46 y 60 dBA.

5.3. Tardes grupo T1

Por la tarde se repitió el tramo de la mañana hasta la plaza de la Glorieta.

El muchacho de 14 años reconoció los siete caños de la fuente de agua de esta plaza. Algún asistente manifestó que era aburrido repetir el recorrido de la mañana.

5.4. Tardes grupo T2

Quizás influenciado por los escenarios mostrados por Ramon Peral Orts o por las sugerencias de los asistentes, lo cierto es que apareció el Maestro Roncador (ver sus libros editados por la SEA), para tomar las riendas en el último tramo de tarde (T2).

El Maestro Roncador se llevó a los asistentes hacia la calle peatonal La Corredera, Plaza de Baix, Portal del Ayuntamiento, donde acabaron escuchando las resonancias del portal, Plaza de la Fuente, soportales y escaleras, y finalmente llegaron a la Pasarela del Mercado, situada sobre el río Vinalopó, donde incluso les hizo escuchar las vibraciones de la baranda del puente (Figura 7). Por ello, perdimos la asistencia de HEAD acoustics.



Figura 7. Un grupo finalizando el recorrido en el puente sobre el río Vinalopó. Fotografía Daumal

6. LAS ENCUESTAS Y SUS RESULTADOS

En particular, se han recogido 18 encuestas en total, con 8 del grupo de mañanas, y 10 en el grupo de tardes. Eso representa que contestan la encuesta el 100% por ciento del total de participantes de la tarde, y el 80% de los de la mañana.

Las notas se han calculado por el procedimiento de la media ponderada; sumando los productos de las respuestas en

cada una de las casillas, por la calificación de 0 para totalmente en desacuerdo, 2,5 para algo en desacuerdo, 5 para ni de acuerdo ni en desacuerdo, 7,5 para parcialmente de acuerdo, y 10 para totalmente de acuerdo, y dividiendo por el número de respuestas.

De esta forma, si todos están en desacuerdo, la nota es un 0, y si todos están totalmente de acuerdo, resulta un 10. En los restantes casos las notas quedan afectadas por lo pesos de cada respuesta.

6.1. Respuestas a la Parte A

La parte A corresponde a los aspectos sociológicos y del estado anímico de cada participante, con edades comprendidas entre 14 y 67 años, con un promedio de 44 años (40 por la mañana y 47 por la tarde). Se han contabilizado 7 hombres y 11 mujeres. La condición laboral resulta de 13 empleados y 5 estudiantes. Y respecto al nivel de estudios, en total resulta 1 de secundaria, 1 de Bachiller o equivalente, 5 de licenciatura/Grado o equivalente, 5 de postgrado/Máster o equivalente, y 6 de Doctorado. Curiosamente, estos últimos se encuentran solamente por la tarde.

Pasamos luego a las cuestiones establecidas por la Organización Mundial de la Salud relativas al estado anímico de cada individuo durante las últimas dos semanas antes de la experiencia, consistentes en “si se ha sentido alegre y de buen humor”, a la que se ha obtenido sobre diez un **7,55**, “si se ha sentido tranquilo y relajado”, con un resultado de **6,11**, “si se ha sentido activo y enérgico”, destacando al obtenerse el valor más elevado con un **8,22**, “si se ha despertado fresco y descansado, obteniéndose solamente un **5,88**, lo que es la peor calificación, y finalmente “si su vida cotidiana ha estado llena de cosas que le interesan”, con un resultado del **7,22**. Las seis respuestas oscilaban desde “todo el tiempo” hasta “nunca”. No se aprecian diferencias entre mañanas y tardes.

6.2. Respuestas a la Parte B. Encuesta específica del Itinerario Dinámico y Estático

Aspectos B.1 Generales

Debe señalarse, que el 67 % se muestra totalmente de acuerdo con que “la experiencia de hacer de ciego le permite escuchar mejor la ciudad y los edificios”. El 33% restante, se muestra parcialmente de acuerdo. Nadie ha mostrado ningún tipo de desacuerdo. Esto confirma la importancia en mantener y extender este método en otras poblaciones. Si se hubieran dado calificaciones, a esta pregunta le habría correspondido un **9,1** sobre 10, siendo la mejor calificación.

Con un **8,61**, le sigue “los sonidos molestos ocultan a los agradables”, en la que un 95 % está total o parcialmente de acuerdo. De todos modos, la pregunta importante “para su formación, un ingeniero acústico debería hacer un recorrido como ciego mediante este método”, ha obtenido un 56 % de aceptación total, un 22% de aceptación parcial, y otro 22 % de indiferencia, por lo que nadie lo ha negado, y podemos concluir que casi todos consideran que se debería realizar

(con un **8,3** se sitúa en tercer lugar en este grupo). La cuarta posición la ocupa la pregunta “con los ojos vendados se puede adjetivar mejor la acústica de los espacios, obteniendo un **8,2** con un resultado también del 95 % acorde total o parcialmente, pero dominando este último. Le sigue la pregunta “me ha sorprendido gratamente algún sonido”, en que la calificación ya baja al notable **7,5**. A la hora de responder cuál es este sonido, indican la fuente, los pájaros y las pisadas.

Con aprobado se sitúa la respuesta positiva a “Creo que este itinerario y sus estaciones muestran la belleza del lugar”, con una calificación solamente de aprobado de **6,52**. Le sigue la de “El recorrido muestra claramente el carácter sonoro de Elche”, con un **6,11**. Todavía con aprobado tenemos “En general dominan los sonidos agradables”, con un **6**. “Definiría este itinerario sonoro como tranquilo”, que obtiene un **5,55**. “Algunos sonidos deberían formar parte del patrimonio Cultural Inmaterial Sonoro de Elche”, con un **5,3**. “Creo que con mi presencia, influyo en el paisaje sonoro del lugar”, con un **5,27**.

Con suspenso vienen “He observado signos sonoros dignos de preservar” que obtiene un **4,6**, “En general los sonidos son muy fuertes” con un **3,75**. Y en suspensos clarísimos tenemos “Definiría el paisaje sonoro escuchado como una sinfonía musical”, donde casi nadie está de acuerdo con esta afirmación, ya que el resultado es de **2,2**, por lo que se contradice con las teorías de Murray Schafer y Hildegard Westerkamp. “Frecuento este lugar”, obteniendo en conjunto una nota del **1,25**, seguramente debido a que casi todos los participantes eran congresistas no lugareños, y por último, “Pasé mucho miedo” con un **0,55**, que indica que han realizado la actividad como ciegos de forma muy relajada.

Los del grupo T2

En algunos casos existe mucha discrepancia entre el grupo de mañanas y el de tardes, y especialmente para aquellos de tardes que han realizado el itinerario alternativo dirigido por el Maestro Roncador, centrado en las zonas peatonales recorridas, y por ello con mayor presencia de transeúntes, elementos naturales, y marcas sonoras y menor incidencia o nula de los vehículos. Para este grupo, el 100 % opina que “El ingeniero acústico debería hacer un recorrido como ciego”, al que corresponde un **10**. Con una nota del **9,5** se responde que “Hacer de ciego le permite escuchar mejor la ciudad y los edificios”. Le sigue con un **8,75** para “Me ha sorprendido gratamente algún sonido”, destacando de entre ellos las pisadas en el suelo de la plaza del ayuntamiento, los pájaros, el puente, y los golpes en la barandilla del puente cuando se pusieron a auscultarlo. Con un **8,12** “Definiría este itinerario como tranquilo”, con un **8** “Con los ojos vendados se adjetiva mejor la acústica de los espacios”, y con un **7,5** que “En general dominan los sonidos agradables”.

El Maestro Roncador estará satisfecho !!!

Aspectos B.2 del itinerario dinámico (al andar), y B.3 al pararse (estático)

En este caso las respuestas consisten en los cinco casos comprendidos entre sonido “muy dominante” a “no domina nada”, y los temas son el ruido de tráfico (coches, autobuses, motocicletas, metropolitano, etc.), otros ruidos (construcción, industria, sirenas, carga de mercancía, actividades como bares, talleres, negocios, etc.), sonidos de otras personas (conversaciones, risas, niños jugando, caminar, etc.), sonidos naturales (canto de pájaros, agua en movimiento, viento en vegetación, etc.), sonidos de marcas (campanas, campanillas, cencerros, aldabas, cascabeles, etc.), sonidos musicales (instrumentos, cantos, música, etc.), sonidos gremiales (alfarero, carpintero, palmero, afilador, butanero, etc.), y por último sonidos informativos (marcha atrás, radio/televisión, etc.)

6.3. Respuestas a la parte C de observaciones finales

“El método Daumal me ha servido para mi educación auditiva” ha obtenido un **8,3** en total (los del grupo T2 de la tarde le dan un **9,5**). “Recomendaría a mis amistades y familiares realizar estos paseos sonoros”, sobresaliente **9,02** en total (los del T2 le dan un **10**). “Ahora soy más consciente de la importancia de los sonidos de la ciudad”, **7,5** (**8,5** los del T2). “Realizado el paseo sonoro, considero que el sentido del oído está infravalorado”, **8,19** (igual los del T2). “Considero que el Ayuntamiento debería hacer itinerarios parecidos para cada barrio de Elche”, **7** (los del T2 dan **8,5**). “Volvería a repetir con los ojos vendados este itinerario” Obtiene un **7,4** en total, mientras que por la tarde resulta un **9,5** para el grupo T2.

7. CONCLUSIONES FINALES

Salvo algún tramo del recorrido, en las conclusiones del congreso (Figura 8), definimos el recorrido como bastante tranquilo, con niveles sonoros no muy altos, que se sitúan entre los 51 y 73 dBA, correspondiendo el primero al Palmeral de Elche y el segundo al compresor de acondicionamiento de una tienda del pasaje Almórida/Hospital. En la Diagonal del Palau y Avenida del Ferrocarril vuelven a ser altos, pero en general los valores medios se encuentran en 66,5 dBA,

Respecto las notas de la encuesta, por orden de calificación más altos, corresponden a: *Recomendaría a mis amistades y familiares realizar estos paseos sonoros*, obtiene un **9,02** (resulta un **10** en el grupo T2 de tardes). *Hacer de ciego me permite escuchar mejor la ciudad y los edificios*, en total ha obtenido un **9,1** (en el grupo T2 un **9,5**). *Los sonidos molestos ocultan a los agradables*, con **8,61**, mientras que en el T2 resultan **7,5**. *Para su formación, un ingeniero acústico debería hacer un recorrido como ciego mediante este método*, ha obtenido una nota resultante total de **8,3**. (un **10** en el T2). *El método Daumal me ha servido para mi educación auditiva*. Obtiene un **8,3** en total, destacando los del grupo T2 de la tarde, que le dan un **9,5**. *Con los ojos*

vendados se puede adjetivar mejor la acústica de los espacios, ha obtenido un **8,2** en todos los grupos. *Volvería a repetir con los ojos vendados este itinerario*. Obtiene un **7,4** en total (por la tarde resulta un **9,5** para el grupo T2). Quizás estas notas más altas del grupo T2 de la tarde son debidas al cambio de itinerario, puesto que, como hemos indicado, el Maestro Roncador suplantó a Daumal y se llevó a los participantes hacia el Ayuntamiento, las arcadas y plazas de acceso, y la pasarela sobre el río Vinalopó, donde les hizo auscultar el pasamanos.

No se observan sonidos gremiales ni de marcas sonoras, ni para formar parte del Patrimonio Cultural Inmaterial Sonoro, y en cambio dominan los de otras personas y tráfico.



Figura 8. Presentación de los resultados de los dos paseos en el acto final. Fotografía TECNIACUSTICA 2022

8. ALGUNA BIBLIOGRAFÍA ESPECIFICA DEL AUTOR EN ESTE TEMA

Daumal i Domènech, F., Vida, J. y Herguedas Campesino, S., “Protocolos del Método Daumal y Método ISO 12913 para la prospección del paisaje sonoro de Elche. ¿Qué escucha la Dama de Elche?” Comunicaciones del 53º Congreso de Acústica, Tecniacústica 2022, Elche, ID-79, Sociedad Española de Acústica, <https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Elche22/ID-79.pdf>

Daumal i Domènech, F. Paisajes sonoros del maestro roncador. Madrid: Sociedad Española de Acústica, 2020. ISBN 978-84-87985-32-4. [URI http://hdl.handle.net/2117/366686](http://hdl.handle.net/2117/366686) ISBN 978-84-87985-32-4 Versión del editor http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Libros/Maestro_roncador.pdf

Daumal i Domènech, F. “Deriva sonora a ciegas” Revista de Acústica, Vol. 50, Nº 3 y 4. 3º y 4º Trimestre 2019, ISSN versión impresa: 0210-3680 versión digital: 2254-2396. Madrid. Apartado Día Internacional de concienciación sobre el Ruido. p 59 - 62. (2019).

Daumal i Domènech, F. Piguillem, N., Díaz N., “Learning the soundscape in urban and architectural itinerary: Listening Barcelona blindfolded” 22nd International Congress on Acoustics, Soundscape: FIA2016-122, Sociedad Argentina de Acústica. Buenos Aires, (2016).

Daumal i Domènech, F. “Maestro Roncador”, Sociedad Española de Acústica, 2014, ISBN 978-84-87985-24-9 Depósito legal: M-20821-2014 URL http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/libro_maestro_roncador.pdf

F. Daumal i Domènech, J. de Gortari. “El ciego, el lazarillo y el escriba-auditor (método para aprender el paisaje sonoro de la ciudad)” 41º Congreso Nacional de Acústica, Sociedad Española de Acústica. León, 2010.

MODELOS POLITÓMICOS DE LA TEORÍA DE RESPUESTA AL ÍTEM APLICADOS A LA EVALUACIÓN DE LA ACÚSTICA DE SALAS MEDIANTE ENCUESTAS.

Salvador Cerdá*, Carlos Abellán, Alicia Giménez¹
Jaume Segura, Rosa M. Cibrián²

¹ Universitat Politècnica de València

² Universitat de València

RESUMEN

Los modelos politómicos son herramientas utilizadas en la teoría de respuesta al ítem (TRI) para medir habilidades o características de los individuos a través de pruebas. A diferencia de los modelos dicotómicos, los modelos politómicos permiten respuestas con múltiples categorías. En este trabajo estudiamos la utilidad de este tipo de análisis para analizar los resultados de las encuestas de valoración de salas desde el punto de vista acústico. Estudiamos los resultados que se obtienen usando las principales librerías desarrolladas en el entorno estadístico *RStudio* y proponemos el uso de una de ella en particular.

ABSTRACT

Polytomous models are tools used in item response theory (IRT) to measure abilities or characteristics of individuals through tests. Unlike dichotomous models that only consider correct or incorrect responses, polytomous models allow responses with multiple categories. In this work we study the usefulness of this type of analysis to study the results of room assessment surveys from an acoustic point of view. We analyze the results obtained using the main libraries developed in the *RStudio* statistical environment.

Palabras Clave— teoría de respuesta al ítem, evaluación subjetiva de salas, selección de modelos

1. INTRODUCCIÓN

La teoría de la respuesta al ítem (IRT) o la teoría del rasgo latente (LTT) es una teoría psicométrica,

utilizada para el análisis de pruebas psicológicas y pruebas generales. Estudia la relación entre un conjunto de datos obtenidos en un proceso de medición (respuestas a ítems de una prueba) con determinadas dimensiones latentes, como los rasgos de personalidad de los sujetos a los que se les ha administrado. En este sentido, proporciona un modelo matemático que presenta de forma simplificada e idealizada el comportamiento de los sujetos y las preguntas. En el campo de las pruebas de habilidad, tenemos un conjunto de preguntas que son formuladas por un grupo de personas. Las preguntas pueden ser correctas o incorrectas. Según los resultados podemos establecer, por un lado, la dificultad de las preguntas, observando el porcentaje de aciertos. Por otro lado, podemos establecer la capacidad de las personas al ver los éxitos que tienen. Con ligeras modificaciones, se pueden considerar preguntas con una calificación de respuesta categórica. La TRI busca encontrar una variable continua que modele la dificultad de las preguntas y las habilidades de las personas. El modelo ajusta esta nueva variable (latente) a cada individuo de tal manera que las probabilidades de responder a cada categoría están relacionadas con el valor de la dimensión latente. En tal caso, se dice que la dimensión latente separa a los individuos de las preguntas. Si las preguntas admiten sólo dos categorías posibles, el modelo utilizado se denomina dicotómico, por ejemplo, Rasch (1960) considera [1]:

$$P(Y_{p,i} = 1 | \theta_p, \beta_i) = \frac{\exp(\theta_p - \beta_i)}{1 + \exp(\theta_p - \beta_i)}$$

en el que la probabilidad de responder correctamente una pregunta se determina en función de la dimensión o habilidad latente de la persona θ_p y la dificultad de la pregunta β_i . En

nuestro caso donde tenemos más de dos categorías en las respuestas, usamos el modelo de crédito parcial (PCM), introducido en 1982 por Masters [2], quien descompuso la respuesta a un ítem en una serie de pares ordenados de categorías adyacentes, luego aplicó un modelo dicotómico a cada par asumiendo discriminaciones iguales entre los ítems. En otras palabras, tenemos que trabajar con un modelo politómico y usamos el modelo de crédito parcial [3]:

$$P(Y_{p,i} = x) = \frac{\exp \sum_{k=0}^x (\theta_p - \tau_{ki})}{\sum_{j=0}^{m_i} \exp \sum_{k=0}^j (\theta_p - \tau_{ki})}$$

siendo: m_i el número de posibles respuestas, x la respuesta al ítem, i el índice del ítem, θ_p la habilidad de la persona y τ_{ki} el parámetro límite para el paso k en el ítem i .

Este modelo está implementado en R en diferentes librerías. En este trabajo valoramos las diferentes librerías analizando los resultados y estableciendo la conveniencia del uso de alguna de ellas. Para ello se utiliza como criterio la correlación entre la variable latente y las puntuaciones experimentales obtenidas en los ítems. Hemos comparado las librerías “cdm” [4], “eRm” [7], “ltm” [8], “mirt” [3] y “TAM” [10], “psychotools” [11] y “sirt” [9]. Para determinar las habilidades de cada individuo se ha optado por la estimación esperada a posteriori (EAP): La estimación EAP es un enfoque bayesiano que combina la distribución previa de las habilidades de la persona con la probabilidad de observar las respuestas. Proporciona un promedio ponderado de los valores de capacidad más probables en función de las respuestas de la persona y la distribución de capacidades en la población [2].

Para la valoración subjetiva de la acústica de salas se ha utilizado una encuesta de nuestro diseño, que se pasó a los asistentes a diferentes conciertos celebrados en 8 teatros, salas de conciertos y auditorios de la Comunidad Valenciana ubicados en las localidades: Valencia, Alicante, Ribarroja, Benaguacil, Liria, Torrent, Algemesí y Castelló. La encuesta compuesta por 58 preguntas se divide en 6 apartados, 3 de ellos directamente relacionados con la sala y la percepción acústica en ella y otros 3 correspondientes a datos sociológicos, preferencias musicales, etc. del oyente y, por tanto, directamente relacionados con

la persona que responde la encuesta. Los tres apartados relacionados con la sala y su acústica, que engloban 48 preguntas, y que son los que analizaremos en este trabajo, corresponden a: Apartado A, “Aspectos generales”; Apartado B, “Percepción acústica detallada”, y Apartado C, “Percepción acústica global”. La encuesta ha sido respondida por 704 personas, de las cuales 184 corresponden a expertos en música, no en acústica de salas, y 520 al público en general asistente al concierto [5], [6].

2. RESULTADOS

Para el análisis de las encuestas hemos considerado que para cada una de las secciones de nuestra encuesta vamos a calcular la variable latente correspondiente. Esta variable latente permite asociar a cada encuesta un valor que en pruebas de educación correspondería a la habilidad del individuo. No obstante, para nosotros la consideramos como una valoración de la sección para la sala. Como tal valoración global, vamos a estudiar la correlación con la puntuación media que obtendría la encuesta como promedio de las respuestas. Estudiamos la correlación entre la VL y esa puntuación para todas las encuestas. Pero también estudiamos las medias por sala que se obtienen por las dos formas. A continuación, mostramos los resultados obtenidos en cada sección.

2.1. Sección A: Aspectos generales

En la siguiente gráfica vemos la distribución de las puntuaciones en la variable latente de todos los encuestados, para cada librería. Se muestra una tabla con las correlaciones entre la variable latente para cada encuesta y la puntuación global obtenida.

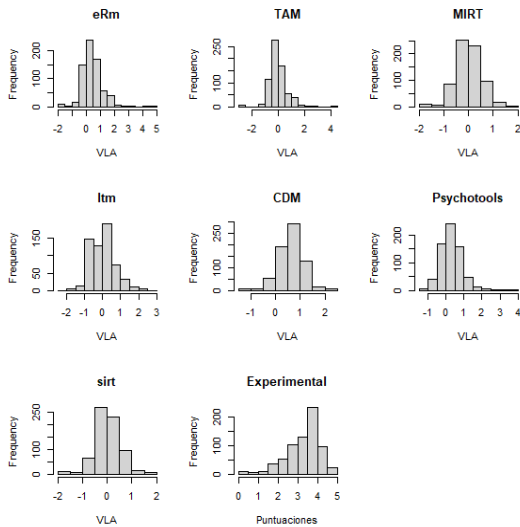


Figura 1. Distribución variable latente sección A para las diferentes librerías y distribución puntuaciones.

Tabla 1. Correlaciones entre la variable latente para la sección A entre todas las librerías.

	tam	mirt	ltm	cdm	psy	sirt	Experimental
erm	0.998	0.959	-0.022	0.956	1.000	0.955	0.876
tam		0.955	-0.020	0.953	1.000	0.952	0.875
mirt			-0.037	0.998	0.973	0.997	0.972
ltm				-0.032	-0.013	-0.042	-0.049
cdm					0.970	0.989	0.969
psy						0.968	0.901
sirt							0.969

En la siguiente tabla consideramos las correlaciones entre la VL y las puntuaciones por sala.

Tabla 2. Correlaciones entre la variable latente para la sección A y las puntuaciones por salas.

	tam	mirt	ltm	cdm	psy	sirt	Experimental
erm	1.000	0.985	-0.191	0.986	0.972	0.984	0.948
tam		0.982	-0.181	0.982	0.966	0.981	0.942
mirt			-0.193	1.000	0.985	0.999	0.987
ltm				-0.176	-0.220	-0.209	-0.185
cdm					0.984	0.998	0.985
psy						0.987	0.964
sirt							0.987

Finalmente estudiamos el error cuadrático medio entre la VL y la puntuación por sala. Como la Variable latente está definida en un intervalo de valores diferente al utilizado en las puntuaciones de cada pregunta, se ha optado por centrar cada distribución en su media. Es decir, se ha calculado

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\hat{x} - \bar{\hat{x}}) - (x - \bar{x})^2}{N}}$$

Tabla 3. Error cuadrático medio entre VLA y puntuaciones por sala.

Librería	RMSE
erm	0.108
tam	0.115
mirt	0.142
ltm	0.551
cdm	0.141
psy	0.129
sirt	0.142

2.2. Sección B: Percepción acústica detallada

En la siguiente gráfica vemos la distribución de las puntuaciones en la variable latente para la sección B de todos los encuestados, para cada librería. Se muestra una tabla con las correlaciones entre la variable latente para cada encuesta y la puntuación global obtenida.

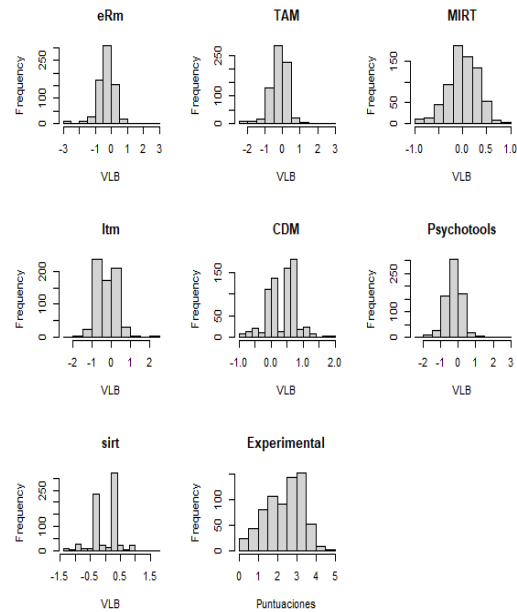


Figura 2. Distribución variable latente sección B para las diferentes librerías y distribución puntuaciones.

Tabla 4. Correlaciones entre la variable latente para la sección B entre todas las librerías.

	tam	mirt	ltm	cdm	psy	sirt	Experimental
erm	0.999	0.828	-0.030	0.949	1.000	0.945	0.944
tam		0.829	-0.032	0.953	0.999	0.949	0.950
mirt			-0.020	0.786	0.807	0.783	0.816
ltm				-0.037	-0.038	-0.035	-0.025
cdm					0.952	0.999	0.957
psy						0.948	0.961
sirt							0.954

Tal y como hicimos en la sección anterior, mostramos ahora la correlación por salas.

Tabla 5. Correlaciones entre la variable latente para la sección B y las puntuaciones por salas.

	tam	mirt	ltm	cdm	psy	sirt	Experimental
erm	1.000	0.934	0.017	0.984	0.978	0.983	0.992
tam		0.934	0.008	0.986	0.980	0.985	0.993
mirt			-0.083	0.892	0.927	0.888	0.933
ltm				0.030	0.068	0.035	0.029
cdm					0.989	1.000	0.992
psy						0.988	0.991
sirt							0.991

Y los RSME trasladados por sala. Vemos que el mejor resultado se obtiene con la librería “erm”.

Tabla 6. Error cuadrático medio entre VLB y puntuaciones por sala.

Librería	RMSE
erm	0.152
tam	0.156
mirt	0.22
ltm	0.322
cdm	0.166
psy	0.159
sirt	0.166

2.3. Sección C: Percepción acústica global

En la siguiente gráfica vemos la distribución de las puntuaciones en la variable latente de todos los encuestados, para cada librería, para las preguntas de la sección C. Se muestra una tabla con las correlaciones entre la variable latente para cada encuesta y la puntuación global obtenida.

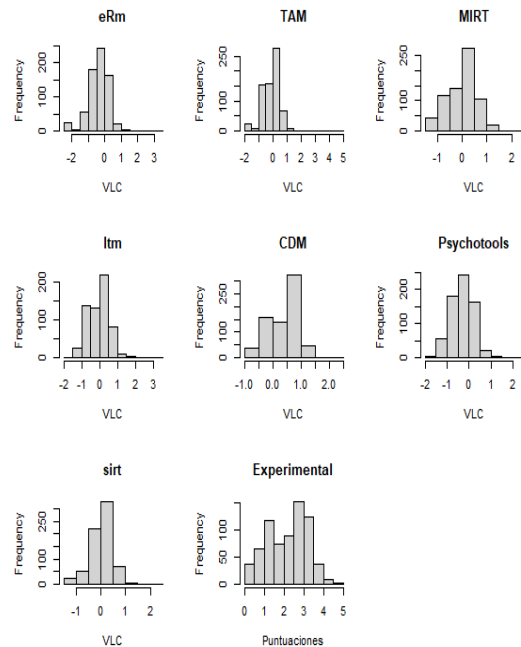


Figura 3. Distribución variable latente sección C para las diferentes librerías y distribución puntuaciones.

Tabla 7. Correlaciones entre la variable latente para la sección C entre todas las librerías.

	tam	mirt	ltm	cdm	psy	sirt	Experimental
erm	0.993	0.957	-0.043	0.984	1.000	0.982	0.967
tam		0.938	-0.048	0.966	1.000	0.964	0.941
mirt			-0.047	0.969	0.963	0.967	0.973
ltm				0.030	0.033	0.031	-0.036
cdm					0.986	0.998	0.982
psy						0.983	0.987
sirt							0.980

Ahora consideramos las puntuaciones por sala.

Tabla 8. Correlaciones entre la variable latente para la sección C y las puntuaciones por salas.

	tam	mirt	ltm	cdm	psy	sirt	Experimental
erm	1.000	0.989	0.139	0.999	0.993	0.999	0.997
tam		0.990	0.126	0.998	0.992	0.998	0.996
mirt			0.144	0.987	0.982	0.985	0.978
ltm				0.158	0.140	0.153	0.131
cdm					0.992	1.000	0.998
psy						0.991	0.993
sirt							0.998

Y finalmente los RSME trasladados para la sección C.

Tabla 9. Error cuadrático medio entre VLC y puntuaciones por sala.

Librería	RMSE
erm	0.175
tam	0.184
mirt	0.165
ltm	0.449
cdm	0.222
psy	0.206
sirt	0.22

3. DISCUSIÓN

Dados los resultados obtenidos, nos decantamos por utilizar la función *PCM* de la librería *eRm*. En las siguientes gráficas podemos ver la relación entre la variable latente y las puntuaciones medias por sala para esta librería.

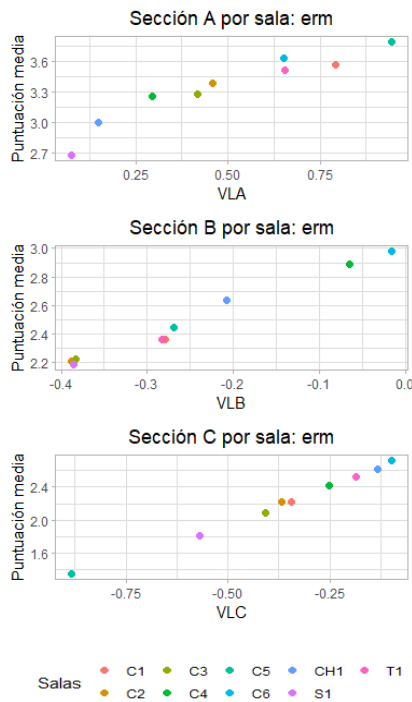


Figura 4. Dispersión entre las puntuaciones y la variable latente para la librería “*eRm*” por sección y salas.

4. CONCLUSIONES

Como hemos mostrado en los resultados para cada sección, la variable latente que proporciona un análisis TRI mediante el modelo de crédito parcial de las encuestas de valoración acústica de salas correlaciona con las puntuaciones medias. Las gráficas muestran que la distribución de la VL no es exactamente igual que las puntuaciones experimentales. Pero las correlaciones entre los valores medios en cada sala de las VL y sus puntuaciones son muy buenas. Si consideramos los errores cuadráticos medios, hemos visto que si bien para algunas librerías no hay muchas diferencias, el mejor resultado para la sección A y B se obtiene con la librería “*erm*”. Para la sección C con la librería “*mirt*”.

La determinación de la variable latente mediante TRI tiene una ventaja sobre la puntuación media directa o experimental, puesto que estas técnicas se han preocupado por obtener las habilidades reales de los individuos estudiados. De tal manera que el análisis de todas las encuestas permite establecer la VL de cada una de ellas con garantía. Estos resultados se han presentado en un reciente congreso [12].

Nuestro siguiente objetivo es estudiar las relaciones entre la variable latente que proporciona este método de análisis y los parámetros objetivos que se utilizan habitualmente para cuantificar la acústica de las salas. También creemos que será interesante estudiar si existe alguna relación entre la variable latente aquí obtenida y los factores que obtuvimos cuando realizamos estudios de componentes principales a estas mismas encuestas [6].

5. REFERENCIAS

- [1] Andrich, D., and I. Marais. 2019. *A Course in Rasch Measurement Theory: Measuring in the Educational, Social and Health Sciences*. Springer Texts in Education. Springer Nature Singapore. <https://books.google.es/books?id=7dKiDwAAQB AJ>.
- [2] Baker, & Kim, F. B. 2004. *Item Response Theory: Parameter Estimation Techniques*. 2nd ed. CRC Press.

- [3] Chalmers, R. Philip. 2012. "Mirt: A Multidimensional Item Response Theory Package for the r Environment." *Journal of Statistical Software* 48 (6): 1–29. <https://doi.org/10.18637/jss.v048.i06>.
- [4] George, A., A. C. AND Robitzsch. 2015. "Cognitive Diagnosis Models in r: A Didactic." *The Quantitative Methods for Psychology* 11 (3): 189–205. <https://doi.org/10.20982/tqmp.11.3.p189>.
- [5] Giménez, Alicia, Rosa M. Cibrián, Sara Girón, Teófilo Zamarreño, Juan José Sendra, Ana Vela, and F. Daumal. 2011. "Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls." *Acta Acustica United With Acustica* 97: 949–65. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:111423124>.
- [6] Giménez, Alicia, Rosa Cibrián, and Salvador Cerdá. 2013. "Subjective Assessment of Concert Halls: A Common Vocabulary for Music Lovers and Acousticians." *Archives of Acoustics* 37 (3). <https://acoustics.ippt.gov.pl/index.php/aa/article/view/98>.
- [7] Mair, Patrick, and Reinhold Hatzinger. 2007. "Extended Rasch Modeling: The eRm Package for the Application of IRT Models in r." *Journal of Statistical Software* 20 (9): 1–20. <https://doi.org/10.18637/jss.v020.i09>.
- [8] Rizopoulos, Dimitris. 2006. "Ltm: An r Package for Latent Variable Modeling and Item Response Analysis." *Journal of Statistical Software* 17 (5): 1–25. <https://doi.org/10.18637/jss.v017.i05>.
- [9] Robitzsch, Alexander. 2023. *Sirt: Supplementary Item Response Theory Models*. <https://CRAN.R-project.org/package=sirt>.
- [10] Robitzsch, Alexander, Thomas Kiefer, and Margaret Wu. 2022. *TAM: Test Analysis Modules*. <https://CRAN.R-project.org/package=TAM>.
- [11] Schneider, Lennart, Carolin Strobl, Achim Zeileis, and Rudolf Debelak. 2022. "An R Toolbox for Score-Based Measurement Invariance Tests in IRT Models." *Behavior Research Methods*. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01689-0>.
- [12] Salvador Cerdá, Carlos Abellán, Jaume Segura, Alicia Giménez, Miguel Arana, Rosa M. Cibrián. Use of item response theory (IRT) in subjective assessment of concert halls. *Internoise* 2023.



EVALUACIÓN DEL PAISAJE SONORO URBANO EN ELCHE CONFORME AL PROTOCOLO ISO 12913

Jerónimo Vida Manzano^{1*}, *Francesc Daumal i Domènech*²,
*Miguel Ausejo Prieto*³, *Sergio Herguedas Campesino*⁴

¹ Universidad de Granada, Granada, España ² ETSAB (UPC-BarcelonaTech), Barcelona, España
³ Eurocontrol, Madrid, España ⁴ HEAD-ACOUSTICS, Barcelona, España

RESUMEN

Durante la celebración en Elche del 53º Congreso Español de Acústica “TECNIAACÚSTICA 2022”, se realizaron dos paseos sonoros por la ciudad aplicando el protocolo ISO 12913. La actividad, complementaria y paralela a la realizada en esa fecha según el protocolo Daumal, se desarrolló en período de mañana y de tarde a lo largo de un mismo recorrido. En la experiencia participaron personas voluntarias, tanto ciudadanía como congresistas, que se desplazaron a pie a lo largo de un camino de 1,2 km de longitud con 8 paradas. Se empleó un cuestionario para la evaluación subjetiva del clima acústico en contexto y se realizaron medidas acústicas coincidentes del ambiente en cada punto conforme a la norma ISO/TS 12913-2:2018. En este trabajo se presentan resultados de la evaluación del paisaje sonoro urbano en la ciudad de Elche según la norma ISO/TS 12913-3:2019 y las conclusiones más importantes conforme a esta metodología.

ABSTRACT

The acoustic climate of Elche urban center, a south east medium size Spanish city, was analyzed by means of two soundwalks coincident with last edition of Tecniacústica congress. The activity was carried out following ISO 12913 standard protocol and also as suggested by Daumal's method, in an attempt to make soundscape research interest and procedures better known among congresses and citizens. The soundwalks took place along the same 1,2 km long path including 8 stops during the morning and the evening. As recommended by ISO 12913 protocol, a survey was used to collect citizens perception data in context and coincident acoustic and environmental information was also recorded (ambisonic audio and 3D photo and video). Main results of ISO urban soundscape assessment are presented in this paper.

Palabras Clave— Paisaje sonoro urbano, clima acústico urbano, calidad acústica, calidad ambiental, diseño urbano, ISO 12913, percepción ciudadana, ciencia ciudadana, soundscape.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del paisaje sonoro urbano no es algo nuevo, encontrando referencias desde principios de los años 70 del siglo pasado con el *World Soundscape Project* liderado por Schafer [1]. Desde entonces, esta disciplina no ha dejado de crecer a partir del trabajo de numerosos investigadores y profesionales que han contribuido a su definición, alcance, importancia y aplicación en el contexto del desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida [2-4].

En la actualidad, la evaluación del ambiente acústico urbano en contexto es uno de los principales exponentes del cambio de paradigma que se está produciendo en la gestión de la contaminación acústica [5] y en el propio diseño de ciudad [6]. Un nuevo escenario en el que el cuidado y preservación de los sonidos propios de la ciudad adquiere un mayor protagonismo en las estrategias y las herramientas que se emplean en la lucha contra el ruido urbano.

Este nuevo escenario implica fundamentalmente dos cosas. Por un lado, la colaboración de las personas, pues la evaluación del ambiente acústico en contexto necesita la participación ciudadana, que aporta a la investigación su opinión, información sobre su percepción del clima acústico en un lugar y momento dado. Una característica que también es reflejo de la importancia que actualmente tienen los proyectos de ciencia ciudadana (Citizen Sensing/Citizen Science) [7], las demandas de mayor participación ciudadana en el desarrollo de los 17 ODS de la Agenda 2030 [8] y los nuevos paradigmas en el desarrollo urbano como el *Sensory Sustainability Science* (SSS) [9].

Por otro lado, implica la necesidad de disponer de herramientas y procedimientos para la realización de

* *Autor de contacto:* jvida@ugr.es

Copyright: ©2023 Jerónimo Vida et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

experiencias en las que deben registrarse datos de opinión y de caracterización del ambiente acústico en el que esas opiniones se han generado.

Datos subjetivos, procedentes del muestreo de opinión, y datos objetivos, procedentes de la instrumentación acústica, que deben ser analizados e interpretados de forma conjunta. De eso se encarga la norma ISO 12913 que, en sus tres partes publicadas hasta la fecha, orienta y guía este proceso [10-12]. El objetivo es armonizar la evaluación del clima acústico urbano en contexto y poner en valor todo este trabajo haciendo que resulte de utilidad pública. Algo que persiguen iniciativas como el catálogo de intervenciones urbanas recopilado por UCL [13] y es el objetivo esencial de la cuarta parte de la norma, actualmente en redacción [14].

2. OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es el estudio y caracterización del ambiente acústico de la ciudad de Elche mediante la aplicación del procedimiento de adquisición de datos y análisis de los mismos establecido en la norma internacional ISO 12913.

De forma complementaria, también pretende contribuir a la difusión del conocimiento sobre la propia norma y a la recopilación de experiencias y datos que fundamenten revisiones futuras de la misma.

3. METODOLOGÍA

La exploración previa de la ciudad de Elche, realizada en octubre de 2022, permitió el diseño de un camino urbano teniendo en cuenta la norma ISO12913-2 [11]. A lo largo de este camino, en el que se establecieron 8 puntos de evaluación, se realizaron dos paseos sonoros, uno de mañana y otro de tarde, el día 3 de noviembre de 2022 [15]. La **Figura 1** muestra el trazado de los paseos sonoros y la **Tabla 1** la localización de los 8 puntos de evaluación.



Figura 1. Trazado paseos sonoros ISO12913, Elche_2022.

Tabla 1. Puntos de evaluación ISO12913, Elche_2022.

PUNTO	Descripción	Foto de ejemplo	CAL. URBANA	Normativa (normativa) LdB
01	Avda. de los Reyes, SEEA Calle del Valle de los Reyes, 1		68,24000, 68,95000	0
02	Avda. de los Reyes		68,30000, 68,90000	200
03	Avda. de los Reyes, 2		68,20000, 68,90000	400
04	Calle de la Virgen de Fátima, 21		68,30000, 68,90000	400
05	Calle de los Reyes, 2		68,30000, 68,90000	200
06	El Estrecho de los Reyes (zona Parque)		68,30000, 68,90000	200
07	Avda. de los Reyes, 2		68,20000, 68,90000	400
08	Avda. de los Reyes, 2 Avda. de los Reyes, 2		68,20000, 68,90000	2,200

Durante el paseo sonoro, tanto de mañana como de tarde, la evaluación acústica subjetiva en cada punto del recorrido se hizo mediante el uso de una encuesta anónima que cada participante llevaba en papel (**Figura 2**). Por otro lado, los datos de niveles acústicos y registros de audio, foto y vídeo para la caracterización objetiva del ambiente acústico coincidente con la evaluación subjetiva, se realizaron con instrumentación aportada para la ocasión por empresas colaboradoras con la SEA (**Figura 3**). Los registros se realizaron conforme a los requerimientos de la norma ISO12913-2 [11].



Figura 2. Evaluación subjetiva mediante encuesta, paseos sonoros ISO12913, Elche_2022.



Figura 3. Evaluación objetiva mediante instrumentación, paseos sonoros ISO12913, Elche_2022.

La encuesta usada en el sondeo de opinión estaba constituida por dos bloques:

- El primer bloque, apartados *i - vi* en **Tabla 2**, solicita información sobre la persona colaboradora, recaba datos para estimar el índice WHO-5 (*Well Being Index*) [16] y ofrece un espacio para la libre expresión de cada participante.
- El segundo bloque, Q1 a Q10 en **Tabla 2**, está formado por 10 preguntas que constituyen el núcleo central de la evaluación acústica en contexto (Q6, Q8 y Q9 no están en la norma, pero la experiencia de los autores ha demostrado su utilidad y conveniencia).

Tabla 2. Encuesta empleada en los paseos sonoros ISO12913, Elche_2022, con indicación del origen de las preguntas (método ISO12913 u otro).

Nº	Pregunta	ISO 12913-1:2018
I	¿Cuál es su EDAD?	Años A. A.2 c)
II	¿Cuál es su GÉNERO?	Años A. A.2 e)
III	Situación LABORAL	Años A. A.2 e)
IV	Nivel de ESTUDIOS MÁS ALTO alcanzado	Años A. A.2 e)
V	¿CÓMO SE HA SENTIDO durante los últimos dos meses?	no ISO (Método B.0.2.0 par 1)
VI	¿Qué pasa por la cabeza? ¿Qué estás pensando? (comparte pensamientos e sentimientos que ocurren al ambiente en este punto)	Método B.0.2.0 par 1
Q1	¿Hasta qué punto puede ser en este momento las siguientes cuatro cosas de sonido?	Método A. C.3.1 par 1
Q2	Para cada uno de los 6 espacios mostrados o continuación, hasta qué punto está de acuerdo o en desacuerdo con que el sonido ambiental actual es...	Método A. C.3.1 par 2 (sonido ambiental)
Q3	En general, ¿cómo describiría el SONIDO AMBIENTE que actualmente le rodea?	Método A. C.3.1 par 3
Q4	En general, ¿hasta qué punto es ADECUADO (apropiado) para este lugar el sonido ambiente que actualmente le rodea?	Método A. C.3.1 par 4 Método B.0.2.0 par 1
Q5	¿Cómo de ALTO (bueno) diría que el sonido (suav) ambiente? (valor mínimo, no calidad)	Método B.0.2.0 par 1
Q6	¿Con qué FRECUENCIA VISITA este lugar?	no ISO
Q7	¿Con qué FRECUENCIA le GUSTARÍA VISITAR este lugar DE NUEVO?	Método B.0.2.0 par 1
Q8	¿Valora la TRANQUILIDAD (la calma) del ambiente sonoro de este lugar?	no ISO
Q9	¿Valora si es AGRADABLE (agradable) el ambiente sonoro de este lugar?	no ISO (comparte a si está de acuerdo) Método B.0.2.0 par 1
Q10	¿SONORIDAD PERCIBIDA de distintas FUENTES en este lugar?	Método B.0.2.0 par 2

4. RESULTADOS

Al presentar los resultados de esta evaluación, es importante recordar el contexto en el que se produce y desarrolla. Los paseos sonoros por Elche constituyen una de las actividades de difusión que se organizan durante Tecniacústica 2022. Es decir, no se trata de un encargo de un organismo oficial ni tampoco el desarrollo de un proyecto de investigación. Estas circunstancias hacen que la base de datos obtenida sea claramente insuficiente para obtener conclusiones definitivas. Sin embargo, esta limitación no resta interés al estudio ni a sus resultados, que deben interpretarse como una primera aproximación y dentro del objetivo de dar a conocer este tipo de estudios y la propia norma ISO12913.

4.1. Participantes (muestra)

Las cifras fundamentales de participación y respuestas obtenidas en los paseos sonoros se muestran en la **Tabla 3**. Teniendo en cuenta que en el paseo sonoro hay 8 puntos de evaluación y que las preguntas de la encuesta requieren un total de 55 respuestas, en la mañana (PS_M) se han cumplimentado 64 encuestas y generado una base de datos con 3.520 ítems y durante la tarde (PS_T) 72 encuestas y generado una base de datos con 3.960 respuestas (ítems).

Tabla 3. Participación y base de datos de percepción del paseo sonoro de mañana (PS_M) y de tarde (PS_T).

	PS_M	PS_T
Participantes (N)	8	9
Hombre	6 (75%)	8 (89%)
Mujer	2 (25%)	1 (11%)
Edad media (años)	38,8	46,1
mínima	19	20
máxima	67	70
Encuestas (Nx8)	64	72
Ítems base de datos (Nx8x55)	3.520	3.960

4.2. Indicadores acústicos y psicoacústicos

Los indicadores acústicos ambientales en cada punto, coincidentes con las encuestas, se han estimado a partir de los registros obtenidos con la instrumentación aportada por las empresas colaboradoras. Estos registros incluyen audio ambisonic (3,2 Gb) y audio binaural (35 Gb), además de grabaciones con cámara acústica (500 Mb), video 3D (45 Gb) y fotografía (2 Gb). Las medidas tuvieron una duración de 10 minutos en cada punto. Mediante el empleo del software Artemis Suite (*HEAD acoustics*), los resultados de los principales indicadores se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Indicadores de ruido ambiental. Paseo sonoro de mañana (PS_M) y de tarde (PS_T), Elche_2022

PS_M (dBA)	Leq	Min	Max	L10	L50	L90
P1	65,7	58,0	75,0	68,3	64,3	61,1
P2	64,0	58,8	77,1	65,5	62,8	61,2
P3	62,7	53,2	81,0	64,7	59,1	55,8
P4	69,4	58,0	84,3	72,3	68,1	60,3
P5	68,8	58,2	85,4	70,4	65,3	61,3
P6	57,7	46,8	81,4	52,1	49,3	48,1
P7	64,0	51,7	73,1	68,3	60,5	54,1
P8	69,9	64,4	80,5	72,1	68,5	66,4

PS_T (dBA)	Leq	Min	Max	L10	L50	L90
P1	61,4	54,1	79,4	63,2	59,1	56,1
P2	59,9	55,1	75,6	61,3	58,8	56,9
P3	57,6	46,4	80,5	55,5	52,0	48,5
P4	70,7	57,8	85,4	74,4	67,8	60,3
P5	64,2	53,1	74,9	66,9	63,4	56,9
P6	57,1	48,6	79,0	57,7	52,6	50,5
P7	63,2	52,2	70,3	67,1	61,1	55,3
P8	69,1	65,3	76,3	70,7	68,3	66,7

En relación a los parámetros psicoacústicos, la **Tabla 5** muestra en cada punto de evaluación durante la mañana

(PS_M) y tarde (PS_T) los siguientes: sonoridad (N5), agudeza (S), aspereza (R), fluctuación (F), tonalidad (T) y, empleando las expresiones de Fastl & Zwicker [17] a partir de los anteriores, el agrado (*Sensory Pleasantness-SP*) y la molestia (*Psychoacoustic Annoyance-PA*).

Tabla 5. Parámetros psicoacústicos. Paseo sonoro de mañana (PS_M) y de tarde (PS_T), Elche_2022

PS_M	N5 (sones)	S (acum)	R (asper)	F (vacil)	T (tuHMS)	SP	PA
P1	21,70	1,12	0,154	0,033	0,351	0,080	23,16
P2	18,60	1,34	0,105	0,015	0,246	0,064	19,47
P3	16,60	1,14	0,130	0,021	0,351	0,101	17,61
P4	30,50	1,29	0,131	0,008	0,191	0,034	31,89
P5	27,50	1,19	0,153	0,022	0,291	0,052	29,10
P6	8,46	1,19	0,105	0,009	0,171	0,101	8,98
P7	23,30	1,21	0,135	0,008	0,230	0,056	24,51
P8	32,60	1,19	0,200	0,006	0,264	0,038	34,76

PS_T	N5 (sones)	S (acum)	R (asper)	F (vacil)	T (tuHMS)	SP	PA
P1	17,70	1,14	0,141	0,007	0,143	0,063	18,77
P2	15,00	1,45	0,074	0,009	0,133	0,051	15,53
P3	10,20	1,14	0,118	0,011	0,179	0,100	10,86
P4	36,70	1,23	0,180	0,008	0,231	0,029	38,81
P5	21,20	1,14	0,148	0,006	0,176	0,058	22,44
P6	11,30	1,12	0,147	0,014	0,182	0,096	12,18
P7	21,40	1,14	0,149	0,005	0,165	0,056	22,65
P8	29,70	1,17	0,194	0,006	0,185	0,038	31,68

4.3. Sonidos dominantes (Q1)

El análisis de sonidos dominantes (Q1) a lo largo del trazado del paseo sonoro se muestra en la Figura 4, tanto durante la mañana (PS_M) como durante el paseo de tarde (PS_T).

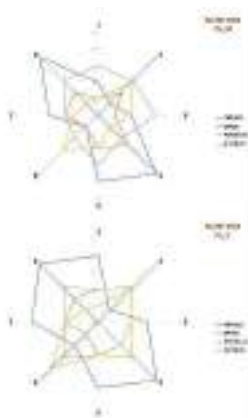


Figura 4. Evaluación sonidos dominantes, Elche_2022.

4.4. Evaluación GLOBAL (Q3, Q4)

La *evaluación global del ambiente acústico* se realiza mediante la pregunta Q3 (ver Tabla 2). La figura 5 muestra el resultado del análisis combinado con las respuestas de la

pregunta sobre el *grado de adecuación* del sonido ambiente en función del lugar (Q4) y el nivel acústico (Leq).

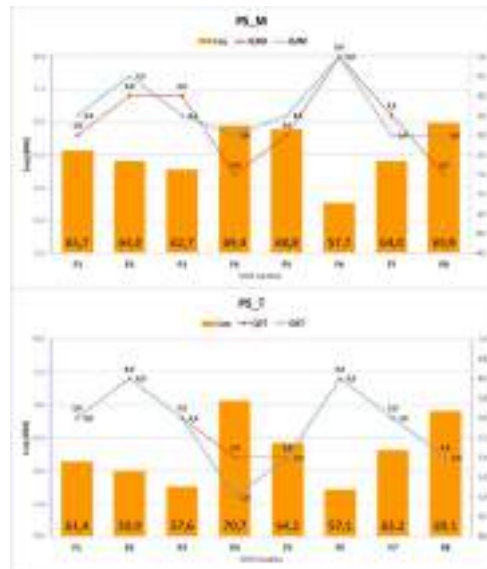


Figura 5. Evaluación global vs adecuación, Elche_2022.

4.5. Evaluación de la TRANQUILIDAD (Q2.5/Q8, Q5)

La evaluación de la *tranquilidad (calm)* se realiza a partir de la pregunta Q2, dimensión Q2.5. Adicionalmente, Q8 también pregunta sobre esta característica del entorno. La figura 6 muestra el resultado de la evaluación combinada con los indicadores acústicos ambientales Leq y L10 y el *nivel de sonoridad* expresado mediante la pregunta Q5 (ver Tabla 2).

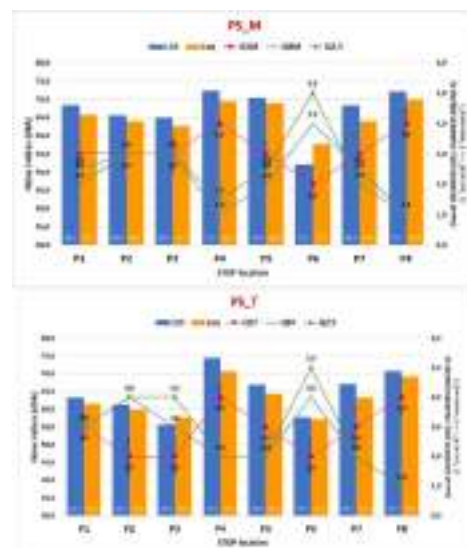


Figura 6. Evaluación de la tranquilidad, Elche_2022.

4.6. Evaluación del AGRADO (Q2.1/Q9, Q5)

La evaluación del **agrado** con el ambiente acústico se puede realizar a partir de la pregunta Q2, dimensión Q2.1 (*pleasant*) y la pregunta directa Q9. La Figura 7 muestra el resultado junto con información de indicadores y sonoridad (Q5)

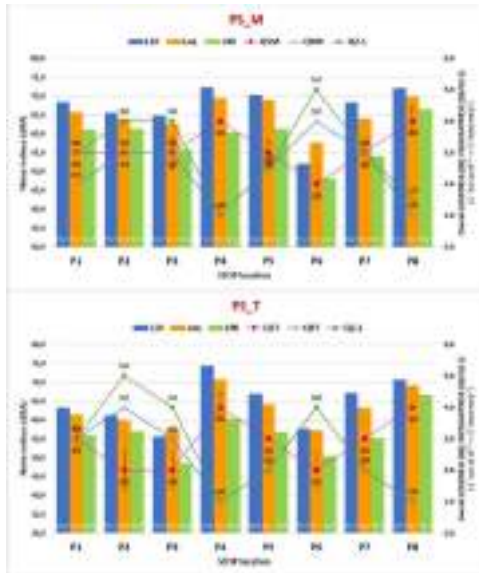


Figura 7. Evaluación del nivel de agrado, Elche_2022.

4.7. Evaluación PAQ - ISO12913 (Q2)

La evaluación del modelo emocional PAQ (*Perceived Affective Quality*), pregunta Q2, constituye el núcleo central de la evaluación del paisaje sonoro. Las coordenadas (P, E), *Pleasantness* y *Eventfulness*, calculadas a partir de las ocho dimensiones del modelo (1.pleasant, 2.chaotic, 3.vibrant, 4.uneventful, 5.calm, 6.annoying, 7.eventful, 8.monotonous) [12], se muestran en la Figura 8.

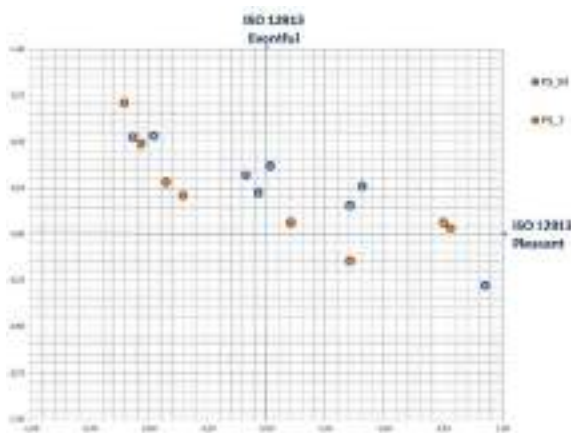


Figura 8. Evaluación emocional ISO12913, Elche_2022.

5. DISCUSIÓN

Uno de los resultados más significativos de la evaluación es la diferencia mañana-tarde del clima acústico en cada lugar (ver Tablas 4 y 5). Esta circunstancia invita a pensar que las evaluaciones ISO12913 en cada punto (al menos 20), deban realizarse preferentemente el mismo día y en el mismo período, algo que habitualmente no es posible. Al mismo tiempo, este hecho lleva a la necesidad de seguir profundizando sobre cuál o cuáles son los elementos que caracterizan el paisaje sonoro de un lugar teniendo en cuenta estas variaciones. Cuando dicha variación no es tan significativa, la caracterización del clima acústico puede venir dada por la combinación de datos de evaluaciones en diferentes períodos (como, por ejemplo, en P6 o P8).

Los resultados obtenidos en relación a los **sonidos dominantes**, Figura 4, muestran que el **tráfico** es la principal fuente salvo en espacios urbanos con limitación de circulación (P2, P3 y P6) y que el **sonido de las personas** es, en general, menos notable durante la tarde.

En relación a la **evaluación global**, Figura 5, se observa la importancia de que el sonido ambiental existente sea adecuado al entorno, afectando esta característica en la evaluación más que el propio nivel acústico de ese entorno. Este resultado, que se presenta durante la mañana y de forma más relevante durante la tarde, pone de relieve la tolerancia de las personas en ambientes acústicos elevados si entienden que existe una justificación para dichos niveles.

La evaluación de la **tranquilidad**, Figura 6, muestra una buena coincidencia en los resultados obtenidos a partir del modelo emocional o mediante pregunta directa. Eso indica que el modelo está bien formulado y que reproduce adecuadamente esta dimensión. En todo caso, la tranquilidad parece estar más condicionada por las características del entorno que por el nivel acústico, incluso por sus valores más altos (L_{10}). En este sentido, los puntos P2, P3 y P6 destacan sobre el resto durante mañana y tarde, aunque en algunos casos sus niveles sean parecidos (por ejemplo, punto P7).

Algo similar ocurre con los resultados de la evaluación del **agrado**, Figura 7, donde además puede verse el efecto de la barrera vegetal en el punto P5 respecto del P4, ambos afectados por una circulación de tráfico intensa, si bien el efecto es mayor durante la mañana.

Finalmente, la evaluación del **modelo emocional** (Figura 8), permite visualizar el cambio en la percepción del ambiente acústico en cada punto durante la mañana y la tarde. Las coordenadas (P, E) se estiman a partir de los resultados de 8 dimensiones, por lo que esta figura en realidad encierra mucha más información. En general se observa una evolución hacia un ambiente más favorable durante la tarde, singularmente en los puntos P1 y P2. Otros, como P6, P4 y P8, aparecen menos alterados, reflejo de que los resultados no dependen tanto del período del día en el que se evalúa.

En el caso singular del punto P5, el efecto de la barrera vegetal parece empeorar la percepción durante la tarde. En

realidad, la evaluación ISO permite observar que son las dimensiones “monótono”, “desagradable” y “caótico” durante la tarde lo que provoca este resultado, probablemente debido a la mayor actividad en la zona durante ese período (personas paseando, tren turístico, etc.) En todo caso, estos resultados muestran la conveniencia de realizar evaluaciones en diferentes momentos del día y su potencial en el diseño y análisis de elementos para la prevención y control del ruido.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado la aplicación del protocolo ISO12913 en la evaluación del ambiente acústico urbano de la ciudad de Elche. Una caracterización que aporta información sobre la forma en la que la ciudadanía interpreta y entiende el entorno, fundamental para el diseño de intervenciones urbanas más eficaces en la prevención y control de la contaminación acústica. En el caso de Elche, la evaluación muestra el efecto de algunos elementos urbanos en el clima acústico y los ambientes urbanos más apreciados por las personas, con independencia de su nivel acústico.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la *Sociedad Española de Acústica* (SEA) su apoyo decidido para realizar esta actividad en el seno de Tecniacústica, a las *empresas colaboradoras* (HEAD acoustics, IAG y Sound of Numbers) los equipos cedidos para los paseos sonoros y, finalmente, la participación generosa de los *voluntarios/as* que tomaron parte en los mismos.

8. REFERENCIAS

[1] The World Soundscape Project (WSP), <https://www.sfu.ca/sonic-studio-webdav/WSP/index.html> (visto sept 2023)

[2] Brooks, B.M., Schulte-Fortkamp, B., Voigt, K.S., & Case, A.U. Exploring Our Sonic Environment Through Soundscape Research & Theory. *Acoustics Today*, 10, 30-40, 2014. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:846669>

[3] Ö. Axelsson, C. Guastavino and S.R. Payne, Editorial: Soundscape Assessment, *Frontiers in Psychology*, 10, 2019. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.02514/full>

[4] Schulte-Fortkamp, B., Fiebig, A., Sisneros, J.A., Popper, A.N., Fay, R.R. (eds) *Soundscapes: Humans and Their Acoustic Environment*. Springer Handbook of Auditory Research, vol 76. Springer 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22779-0>

[5] Vida, J., Poniendo en valor el sonido urbano: Introducción a la Norma ISO 12913, *Revista de la Sociedad*

Española de Acústica (SEA) Volumen 54, números 1 y 2, pp. 53-88, 2023. <http://documentacion.sea-acustica.es/revista/4659>

[6] Kang, J. Soundscape in city and built environment: current developments and design potentials. *City Built Enviro* 1, 1, 2023. <https://doi.org/10.1007/s44213-022-00005-6>

[7] Coulson S, Woods M and Making Sense EU, Citizen Sensing: An Action-Orientated Framework for Citizen Science. *Front. Commun.* 6:629700, 2021. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcomm.2021.629700/full>

[8] Objetivos de Desarrollo Sostenible y Agenda 2030, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (consultado septiembre 2023)

[9] Heinrichs, H. Strengthening Sensory Sustainability Science—Theoretical and Methodological Considerations. *Sustainability*, 11, 3, 769, 2019; <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/769>

[10] ISO 12913-1: 2014, Acoustics-Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. <https://www.iso.org/standard/52161.html>

[11] ISO/TS 12913-2: 2018, Acoustics-Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements. <https://www.iso.org/standard/75267.html>

[12] ISO/TS 12913-3: 2019, Acoustics-Soundscape — Part 3: Data analysis. <https://www.iso.org/standard/69864.html>

[13] Catalogue of Soundscape Interventions (CSI). The CSI Project Team, 2023 <https://soundscape-intervention.org> (visto sept 2023)

[14] ISO/PWI TS 12913-4: #####, Acoustics-Soundscape — Part 4: Design and Intervention. (*working draft*)

[15] Daumal I Domènech, F., Vida, J. y Herguedas Campesino, S., Protocolos del Método Daumal y Método ISO 12913 para la prospección del paisaje sonoro de Elche. ¿Qué escucha la Dama de Elche? *Comunicaciones del 53º Congreso de Acústica, Tecniacústica 2022, Elche, ID-79, 2022.* <https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Elche22/ID-79.pdf>

[16] WHO-5 Well Being Index. <https://www.psykiatri-regionh.dk/who-5/Pages/default.aspx> (visto sept 2023)

[17] H. Fastl and E. Zwicker, *Psycho-acoustics: Facts and Models*. Springer, 3rd updated edition, 2007.



SOUNDSCAPE RESEARCH IN VR

Michael Vorländer^{1*}
Josep Llorca-Boft^{2,3}

¹Institute for Hearing Technology and Acoustics (IHTA), RWTH Aachen University, Germany

²Person-focused Analysis of Architectural Design, IHTA, RWTH Aachen University, Germany

³Centre for Qualitative Urban Ideation and Simulation (QURBIS), UPC Barcelona, Spain

RESUMEN

El enfoque del “Soundscape” supuso un avance muy importante en la evaluación del ruido ambiental. Los datos obtenidos son mucho más significativos que los puros datos de medición, ya que se tiene en cuenta la respuesta humana al entorno de varias maneras, incluido el contexto multimodal, conductual, cultural y estacional. Si estos escenarios complejos se simulan en Realidad Virtual (RV), existen oportunidades para estudiar las respuestas humanas de forma reproducible, pero se plantean grandes retos en lo que respecta a la precisión de la visualización y la auralización y a la validez ecológica al transferir las impresiones perceptivas a la situación de laboratorio.

ABSTRACT

The Soundscape approach created a very important progress in environmental noise assessment. The data obtained are much more significant than pure measurement data, since the human response to the environment is taken into consideration in several ways, including the multimodal, behavioural, cultural and seasonal context. If these complex scenarios are simulated in Virtual Reality (VR), there are opportunities to study the human responses in a reproducible way but there are severe challenges as concerns the accuracy of the visualization and auralization and the ecological validity of transferring the perceptual impression to the laboratory situation.

Palabras Clave— Environmental sound, audio-visual simulation, auralization, Virtual Reality.

1. INTRODUCTION

The auralization of environmental sound offers versatile potential for the elucidation of sound immission and, thus, also makes an innovative contribution to research on noise

effects. In addition to technical investigations into the principles of the sound generation and sound propagation, perception experiments and their transferability to other experimental environments are the core of the Soundscape approach [1, 2, 3]. Established methods for the investigation of soundscapes are described in ISO/TS 12913-2 [4]. They are often used in soundwalks on-site (for example [5]). With auralization and VR technology, the core idea is to make acoustic scenes audible in virtual environments on the basis of separately adjustable source, propagation and receiver models as well as spatial reproduction formats [6]. The hypothesis is that soundwalks could be done in the laboratory under more controlled experimental conditions. To this end, the freely available auralization software Virtual Acoustics (VA) is being continuously developed at the Institute of Hearing Technology and Acoustics (IHTA) at RWTH Aachen University. For direct demonstration of the acoustic effects of noise control measures, auralisations enable realistic and cost-effective comparisons for options in decision-making planning processes.

In this paper, we discuss the workflow of creating Soundscapes in VR, and we present application examples.

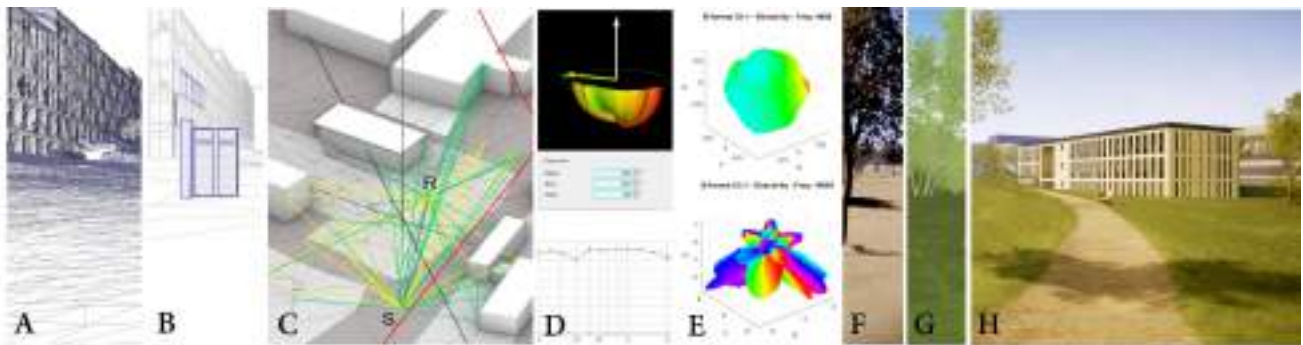
2. AURALIZATION WORKFLOW

2.1. Creation of audio-visual models

The creation of a digital twin for soundscape studies has particular prerequisites for both the audio and visual models. This distinction emerges from the different physical behavior of light and sound phenomena, and how they interact with the built environment. However, it is very important to understand the differences for the modelling process in a common framework [7]. Firstly, two different geometrical models need to be built: one for the sound propagation, another for the light propagation. The features of the visual model have no influence on the acoustic model except that both models have the same dimensions and are referenced to

* **Autor de contacto:** mvo@akustik.rwth-aachen.de

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



the same origin point and orientation in their coordinate systems.

To prepare the models, three main modules determine the whole modelling chain. Firstly, the source model: algorithms for determination of the properties of sound sources and light sources (for example [8]). They will be defined separately and attending to the most salient acoustic and visual effects (see section 2.2). Audio and visual source models only will share location and orientation between models. Secondly, the propagation model will determine the transmission from the sources through the environment. The preparation of the propagation model presents several challenges and important modelling decisions to be taken into account. For example, the level of detail in the geometry definition greatly varies between both modalities. Whereas visual modelling needs geometrical detail of a few centimeters within 5 meters around the receiver, the acoustic model will need polygon dimensions equivalent to half of the lowest audible wavelength (between 0.5 to 1 meter). The geometrical models are complemented with material definitions, which include important features, such as absorption, reflection or scattering. The propagation acoustic models can be built after the detailed visual one by simplification of geometries [7], or both independently based on a common ground, like a photogrammetric capture [9]. Finally, the receiver or reproduction model includes listeners and viewers, which share the same location and orientation. All the effects calculated from the sources, through established reproduction methods such as headphones, loudspeakers, head-mounted displays, monitors, or combinations of them.

2.2. Simulation

Acoustic simulation models are very well developed. The main difference between models are their applicability in terms of uncertainty and computational efficiency for a) indoor vs. outdoor environments, b) low vs. high frequencies. Furthermore, source movements such as in the case of vehicle sound sources are a decisive factor for inclusion or exclusion of computational methods. For outdoor sound propagation,

Figure 1. Modelling workflow example: A) photogrammetry; B) visual geometry; C) acoustic geometry and sound propagation paths; D) sound source directivity characterization; E) 1st HOA receiver characterization; F) light sources and shadows calculation; G) visual materials definition; H) Final audio-visual model of IHTA park [9]

specific challenges are source movements, atmospheric propagation effects (meteorological conditions), acoustic boundary conditions of building façades (diffraction, scattering), and the ground effect for sound reflection at grazing incidence [10].

In contrast to room acoustic modelling, however, some features of outdoor sound propagation are relaxing the computational effort. While room-acoustic impulse responses contain a rapidly increasing reflection density, the impulse responses in outdoor scenarios are rather sparse. For this reason, the propagation effects can be processed more efficiently path by path by using filters with variable delay lines (VDL), as illustrated in fig. 2.

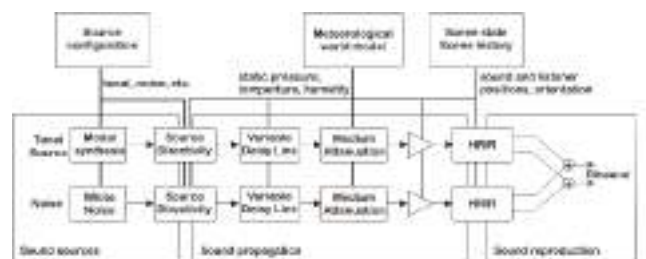


Figure 2. Real-time simulation of outdoor sound propagation with audio-visual VR scene and illustration of the noise footprint on the ground (after [6])

The temporal features such as the propagation delays and corresponding 3D filters must be created for the direct sound and for each reflection/diffraction/scattering path between the source and the receiver. Accordingly, ray tracing and image sources and all other numerical methods yielding energy and delays of propagation paths are candidates to determine the physical behaviour of sound in a virtual scenario. The simulation is used to predict transmission paths

from a source to a receiver in an environmental situation, which is entirely based on digital input data. This is basically identical with the situation in indoor scenarios.

2.3. 3D sound reproduction

Virtual acoustics requires 3D audio technology. The fundamentals of 3D audio - spatial hearing - begin with the consideration of the sound incidence at the listener's head and torso from various directions. This part can be described by filters as well, using the well-known Head-Related Transfer Functions (HRTFs) in the frequency domain and Head-Related Impulse Responses (HRIRs) in the time domain, see fig. 2. HRTFs are specific for the angles of sound incidence, and they are specific for each individual person [11].

Loudspeaker arrays may serve as alternatives to binaural headphone reproduction. The sound field can also be reproduced within a certain area of listener's "sweet spot". Loudspeakers arranged around the sweet spot then serve as an amplitude- and phase-controlled array to reproduce a spatially distributed incident sound field, for example using Higher-order Ambisonics (HOA).

3. APPLICATION EXAMPLE

3.1. IHTApark

The VR framework "VA" [12] has been tested extensively in the case study "IHTApark", a digital twin of a real environment monitored with acoustic and visual recordings, as well as weather indicators. The real laboratory is located nearby the Institute for Hearing Technology and Acoustics, at the geographical coordinates of 50.78054, 6.06628 (<https://goo.gl/maps/yrGkUtlLeLHMLNF46>) [13].



Figure 3 Virtual Soundwalk at the IHTApark using headphones and VR glasses. The participant is asked to make use of virtual GUIs to describe and rate the different scenarios.

The digital twin has been under development since its creation during the COVID-19 pandemic, and it is a common platform where the main urban acoustic simulation features have been or are being implemented: sound propagation, several sources, source directivities, receiver HRTFs, HOA output, surface material absorption, surface scattering, edge diffraction, atmospheric propagation effects, real-time simulation, etc. Additionally, the visual simulation includes material reflection, diffusion and albedo, different levels of geometry detail, sun and sky lights, atmospheric propagation effects, vegetation and terrain meshes, etc. in three different weather configurations: summer, rainy and winter [9].

Such simulations are being used to unfold how different population groups perceive and describe urban soundscapes, see fig. 3. In order to achieve that, the Individual Vocabulary Profiling (IVP) technique [14] allows participants describing the simulated soundwalks with their own words ensuring that the reproducibility of the environment is the same. With this, several research questions can be investigated. For example, how several descriptive words are rated much more consistent over environments than others, especially those describing dynamic variations of the environments investigated by using psychoacoustic metrics [15].

4. CONCLUSION

The workflow of acoustic simulation, auralization and visualization of urban scenarios is complex and requires careful consideration of CAD model design and acoustic parameter settings. While the propagation models are quite advanced, input data often lack precision with regards to absolute references. Relative differences in the environment such as weather conditions or interventions in the built environment can well be investigated in listening experiments or soundwalks.

It was presented a case study at the IHTApark model. The VR framework is modular, enabling the work in packages and compatible formats. The results are also accessible in online channels such as Youtube. This way, soundwalks can be performed online, if it is ensured that the technology for audio-visual reproduction at the user's end is calibrated.

The datasets generated for this study can be found in the Open Science repository under the following permanent links:

IHTApark in ZENODO:

<https://doi.org/10.5281/zenodo.4629759>

IHTApark in GITHUB: <https://git.rwth-aachen.de/ihta>

Example auralizations can be found here:

<https://www.akustik.rwth-aachen.de/go/id/dzhe/lidx/1>

12. REFERENCES

- [1] G. Brambilla, L. Maffei, “Perspective of the soundscape approach as a tool for urban space design,” *Noise Control Eng. J.* 58, pp. 532–539, 2010
- [2] L. Brown, “A review of progress in soundscapes and an approach to soundscape planning,” *Int. J. Acoust. Vib.* 17, pp. 73-81, 2011
- [3] J. Kang, B. Schulte-Fortkamp, *Soundscape and the Built Environment*. Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2017.
- [4] ISO/TS 12913-2, Acoustics — Soundscape — Part 2: Data collection and reporting requirements, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland 2018
- [5] M Yang, J. Kang, “Psychoacoustical evaluation of natural and urban sounds in soundscapes,” *J. Acoust. Soc. Am.* 134, pp. 840-851, 2015
- [6] M. Vorländer, *Auralization - Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. 2nd edition. Springer Nature Switzerland AG, 2020
- [7] J. Llorca-Bofí, M. Vorländer, “Multi-Detailed 3D Architectural Framework for Sound Perception Research in Virtual Reality,” *Frontiers in Built Environment* 7, article 687237, 2021
- [8] R. Pieren, K., Heutschi, J. Wunderli, M. Snellen, D. Simons, “Auralization of railway noise: Emission synthesis of rolling and impact noise,” *Appl. Acoust.* 127, pp. 34-45, 2017
- [9] J. Llorca-Bofí, C. Dreier, J. Heck, M. Vorländer, “Urban Sound Auralization and Visualization Framework—Case Study at IHTA park,” *Sustainability* 14, pp. 2026, 2022
- [10] ISO 9613; Acoustics—Attenuation of Sound during Propagation Outdoors—Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere, ISO 9613-1:1993; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1993
- [11] J. Blauert, *Spatial Hearing - The psychophysics of human sound localization*. 2nd edition MIT Press Cambridge MA
- [12] Open access software VA: www.virtualacoustics.org
- [13] Youtube video: Demonstration of the virtual IHTA Park: <https://youtu.be/rudxfV94UwA>
- [14] J. Llorca-Bofí, C. Sezer, J. Heck, M. Vorländer, “Unfolding urban vocabularies – Audio-visual description of public spaces,” in Proc. 48th Jahrestagung für Akustik: Stuttgart DAGA 2022.
- [15] C. Dreier, M. Vorländer, “Aircraft noise - Auralization-based assessment of weather-dependent effects on loudness and sharpness,” *J. Acoust. Soc. Am.* 149 (5), pp. 3565-3575, 2021

MENORCAENSONS: UNA BASE DE DATOS DE PAISAJES SONOROS PARA INVESTIGACIÓN Y PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL Y NATURAL

Ignacio Pavón García¹, Roberto San Millán Castillo², Marcos Ledesma Barber¹, Manuel Salcedo², Luis Sigcha³

¹ Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

² Universidad Rey Juan Carlos – EIF – Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Camino del Molino, 5, Fuenlabrada (Comunidad de Madrid, España)

³ Data-Driven Computer Engineering (D2iCE) Group, Department of Electronic and Computer Engineering, University of Limerick, Limerick, V94 T9PX, Ireland

RESUMEN

Los paisajes sonoros forman parte del patrimonio cultural y natural en cualquier parte del mundo. El acelerado ritmo del progreso y la globalización podrían hacer desaparecer este legado intangible. Así, su registro y custodia parece una estrategia beneficiosa que sirva para la preservación del patrimonio sonoro. La UNESCO declaró Menorca Reserva de la Biosfera en 1993. Culturalmente, la isla ofrece un marco incomparable gracias a su historia y emplazamiento únicos, que incluyen el idioma y fiestas tradicionales. Sin embargo, Menorca presenta una presión poblacional desproporcionada en la isla a causa del turismo de temporada. El estudio pormenorizado de paisajes sonoros requiere un registro amplio de datos. Por tanto, la generación de una base de datos adecuada es obligatoria para su investigación. Este trabajo presenta las características y gestión de una base de datos de paisajes sonoros innovadora. *MenorcaEnSons* ofrece una variedad de paisajes sonoros significativos de la isla, con un rango considerable de posiciones fijas y paseos sonoros realistas, en formatos diversos de grabación, tanto binaural, como monoaural y estéreo, junto con videos sincronizados y otros metadatos. Se muestran algunas aplicaciones implementadas para investigación y los próximos pasos, basados en el uso de esta base de datos.

ABSTRACT

Soundscapes are part of the cultural and natural heritage everywhere in the world. Rapid progress and globalization could lead to the disappearance of this intangible heritage. Thus, recording and preserving them seems to be a beneficial strategy for the preservation of sound heritage. UNESCO declared Menorca a Biosphere Reserve in 1993. From a cultural point of view, the island offers an incomparable setting thanks to its unique history and location, including its language and traditional festivities. However, Menorca has a huge demographic pressure on the island due to seasonal

tourism. The detailed study of soundscapes requires extensive data recording. Therefore, the generation of an adequate database is mandatory for their research. This paper presents the characteristics and management of an innovative soundscape database. *MenorcaEnSons* offers a variety of significant soundscapes of the island, with a considerable range of fixed positions and realistic soundwalks, in various recording formats, both binaural, monoaural and stereo, together with synchronized video and other metadata. Some applications implemented for research and the next steps based on the use of this database are shown.

Palabras Clave— Paisajes sonoros, base de datos, preservación patrimonio sonoro.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de Paisaje Sonoro (Soundscape) fue definido por el músico R. Murray Schafer en 1977 como “el sonido no como un elemento físico del medio, sino como elemento de comunicación e información entre el hombre y el medio (urbano, rural o natural)” y, considerándolo, como “el campo total de sonidos donde quiera que estemos”.

El paisaje sonoro se define actualmente como la percepción, experimentación y / o comprensión del entorno sonoro mediado por el contexto [1]. Este concepto ha sido ampliado y matizado desde su concepción en 1977, teniendo en cuenta la actualidad diferentes aspectos de análisis, diseño y gestión de ambientes acústicos, posicionando al ser humano como el actor principal [2-8]. Bajo este paradigma, los aspectos subjetivos y objetivos del entorno sonoro deben ser evaluados de tal forma que la caracterización de sus propiedades y percepción se realice de acuerdo con su contexto, por lo que requieren un enfoque multidisciplinar en lo que respecta a las ciencias sociales, naturales y la física (acústica) [9, 10]. En este área, la investigación comienza con la percepción humana y luego se convierte en parámetros físicos, en contraste con la investigación de ruido ambiental,

que se centra principalmente en la reducción de los niveles de ruido cuando se produce molestia [11].

El paisaje sonoro se debe considerar como parte integral del entorno vital. Stockfelt afirma que el sonido es una necesidad existencial y que los paisajes sonoros son esenciales para el bienestar [12].

Resulta fundamental, tal y como indica Botteldooren en [13], que el diseño, evaluación y gestión de los paisajes sonoros sea tenido en cuenta en cualquier tipo de planificación, ya sea territorial, sobre movilidad urbana o ambiental, puesto que es necesario considerar la calidad acústica debido a su elevada incidencia en el bienestar de la población, para alcanzar la protección y conservación de paisajes sonoros con un especial interés, y conseguir satisfacer las necesidades y requerimientos de la ciudadanía en lo que se refiere a calidad ambiental.

En la actualidad, multitud de equipos de investigación a nivel internacional nos encontramos trabajando en la definición, determinación, cuantificación y catalogación de paisajes sonoros. Prueba de ello es la intensa actividad normativa reciente (ISO 12913-1:2014, ISO/TS 12913-2:2018 e ISO/TS 12913-3:2019), así como la enorme cantidad de artículos y proyectos de investigación generados en los últimos años en el ámbito de la calidad acústica ambiental. Los estudios de paisajes sonoros han crecido en los últimos años de forma exponencial, con la finalidad de comprender mejor el entorno urbano actual, su planificación futura y los beneficios resultantes para la salud y la calidad de vida de quienes lo habitan hoy y lo habitarán en el futuro [14-16].

La actual definición propuesta por ISO 12913-1 [1] establece una clara diferencia entre el paisaje sonoro y el entorno acústico [14, 18]. El estudio convencional del entorno acústico comprende principalmente la descripción, clasificación y medición de las fuentes de sonido componentes [19-21], utilizando energía, frecuencia y descriptores estadísticos promediados en el tiempo, y en algunos casos descriptores psicoacústicos [22-25]. Por otro lado, el concepto de paisaje sonoro implica la percepción del entorno acústico. Diferentes modelos de evaluación subjetiva se han propuesto en la literatura. Éstos proponen el uso de atributos perceptuales tales como la agitación (*eventfulness*), el placer experimentado por el oyente (*listener pleasure*) y la actividad sonora (*sound activity*), por nombrar algunos de ellos [26-30]. La influencia de otros estímulos (principalmente visuales) en la percepción del sonido también está siendo objeto de algunos estudios [31-33].

En este contexto, es de vital importancia identificar aquellos paisajes sonoros exclusivos de un determinado lugar, catalogarlos, caracterizarlos, analizarlos y tomar acciones para preservar aquellos que tengan un especial interés cultural o natural.

En el caso que nos ocupa, la isla de Menorca posee características que la hacen única desde un punto de vista natural y cultural, declarada Reserva de la Biosfera por la

UNESCO en el año 1993 y donde la actividad humana se desarrolla de forma compatible con la conservación de los recursos naturales y del patrimonio cultural.

Aunque la isla de Menorca posee unos valores ambientales incuestionables, también presenta problemas ambientales debido fundamentalmente a la presión turística y a la estacionalidad de los visitantes.

El Observatori Socioambiental de Menorca (OBSAM) elabora periódicamente un análisis de la población estacional de la isla y calcula la presión humana diaria, identificando que, en ciertas fechas del mes de agosto, se produce la presencia simultánea de más de 200.000 personas en la isla, mientras que su población residente es de alrededor de 80.000 habitantes [34].

Según el 5º Ecobarómetro de las Islas Baleares, el 56% de los ciudadanos de las Islas Baleares consideran que la llegada de turistas a las islas en verano es excesiva, teniendo en cuenta sus costes y beneficios. En relación con los principales problemas que afectan al medio ambiente, en primer lugar, aparece la masificación de vehículos (39%), siendo la masificación de personas la que ocupa el segundo lugar (30%) [35].

Aunque, en términos generales, la calidad acústica ambiental en Menorca se encuentra bien valorada por sus habitantes, tal y como se muestra la encuesta de percepción ciudadana realizada en 2018 por el OBSAM [36], donde la valoración de la “tranquilidad y la ausencia de ruido” obtiene una puntuación de 7,4 puntos sobre 10, la isla de Menorca no es una excepción a la situación de otros lugares en cuanto a la contaminación acústica. Fuentes de ruido como el tráfico rodado y aéreo, las actividades comerciales, así como determinadas prácticas culturales resultantes del aumento de los conglomerados urbanos, pueden generar emisiones acústicas que presentan un peligro potencial para la salud de las personas y un deterioro de la calidad de vida [14-16, 37, 38].

Por otro lado, la especialización de los espacios y la necesidad de generar coherencia entre los diferentes estímulos que ofrecen los entornos urbanos ha producido que los enfoques tradicionales de la gestión acústica ambiental, centrados principalmente en el control de los niveles de presión sonora, deban ampliarse para empezar a considerar aspectos cognitivos, contextuales y semióticos, en función del uso y significado de los lugares [21, 39]. Esto deriva en la necesidad de ampliar el enfoque tradicional de control del ruido ambiental para que las personas sean el centro de los modelos de gestión acústica ambiental urbana [2-8, 40].

Analizando la distribución temporal de la presión humana diaria en Menorca parece lógico inferir que la calidad de ciertos recursos y factores ambientales puede verse comprometida en determinados periodos del año.

Uno de los factores claves en el desarrollo de las actividades turísticas es la calidad ambiental de un destino, teniendo en cuenta que una buena calidad ambiental es un factor determinante para el desarrollo del turismo.

Recientemente se ha acuñado un término para definir el fenómeno basado en la masificación turística que sufren algunos destinos vacacionales, que pasan de ser populares a estar tan abarrotados que es imposible disfrutar de ellos y protegerlos o gestionarlos de manera sostenible. Dicho término se conoce como *overtourism* (sobreturismo) [41]. El sobreturismo implica un gran consumo de recursos y el incremento de impactos ambientales tales como la contaminación del aire y de los recursos hídricos, así como la pérdida de calidad acústica ambiental de una zona, entre otros impactos. Uno de los efectos del turismo en las ciudades es la degradación del entorno acústico, estando asociado al incremento del transporte, a las actividades recreativas asociadas y sus implicaciones en los usos comerciales locales [42].

Dicha degradación de la calidad acústica se puede producir por incremento de ruido ambiental al interactuar en el entorno un mayor número de emisores acústicos, o bien por otras causas, como pueden ser la pérdida de la diversidad y de la identidad acústica de un determinado entorno, así como el enmascaramiento de señales y sonidos característicos. [43].

Actualmente ciertos destinos corren serio riesgo de convertirse en decorados, sus habitantes en figurantes y su ambiente acústico quedar homogenizado y sin ningún tipo de especificidad o diferencia con respecto a cualquier centro de ocio o centro comercial situado en cualquier otra parte del mundo. Para tratar de evitar que esto suceda, los lugares deben seguir teniendo una determinada especificidad y, por ende, mantener características acústicas propias. Un lugar puede definirse como un "espacio con identidad, relacional e histórico" [44], por lo que un espacio que "no puede definirse ni como lugar con identidad, ni como relacional, ni como histórico, puede ser considerado como un no lugar" [45]. Acercando este concepto al campo de los paisajes sonoros, aquellos entornos sonoros que no representen o generen identidad, evoquen algún recuerdo o despierten algún sentido de pertenencia en el oyente podrían ser considerados como "no lugares sonoros". Ejemplo de "no lugares sonoros" son aquellos en los que las fuentes sonoras que lo componen y los usos que se le da a este espacio no varían dependiendo de la localidad, como es el caso de espacios afectados por infraestructuras de transporte, entornos industriales o entornos comerciales conformados por franquicias y cadenas de ámbito global [39, 46].

En diferentes destinos turísticos se han realizado estudios en donde se identifican problemas comunes de contaminación acústica y pérdida de calidad sonora, ejemplo de ello son estudios llevados a cabo en Grecia [47], Venecia [48], Budapest, Dublín, Suiza, y Praga. [49]. En algunos de estos lugares se ha propuesto, por parte de las autoridades locales, la aplicación de medidas encaminadas a la rehabilitación del entorno acústico y a la mejora de la calidad de la vida [50], ejemplo de ello con propuestas como la limitación de nuevas licencias para la apertura de comercios de souvenirs y recuerdos, limitación del espacio destinado a

terrazas al aire libre, ajuste del número de cruceros que atracan en sus puertos, limitación del número de plazas para realizar visitas turísticas en autobuses, imposición de tasas turísticas, limitación de los vuelos en horarios nocturno, limitando de licencias de locales de comida rápida, presencia de informadores municipales con diferentes denominaciones: Agentes cívicos (Barcelona), Ángeles del decoro (Venecia), desincentivo del alquiler de apartamentos turísticos a través de plataformas digitales y otras.

En el ámbito de la acústica ambiental es importante conocer si la calidad acústica de un determinado espacio se ve comprometida por el desarrollo de distintas actividades económicas, ya sean de tipo industrial, y turística, permitiendo encontrar un equilibrio que permita la coexistencia de diferentes actividades con una adecuada calidad de vida de los habitantes y visitantes.

En el año 2003, con la Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial (PCI) (UNESCO, 2003), la UNESCO reconoció la estrecha conexión entre el patrimonio cultural material e inmaterial y amplió el concepto de patrimonio cultural incluyendo la salvaguardia de "prácticas, representaciones, expresiones, conocimientos, habilidades" e "instrumentos, objetos, artefactos y espacios culturales asociados a ellos, que las comunidades, los grupos y, en algunos casos, los individuos reconocen como parte de su patrimonio cultural" [51].

El reconocimiento del PCI implica la recuperación de las expresiones "vivas" de la cultura, transmitidas oralmente de generación en generación y reproducidas constantemente por las comunidades. El PCI desempeñan un papel fundamental en la transmisión a la comunidad de un sentido de identidad cultural, así como de diversidad y singularidad, en un período histórico que se caracteriza profundamente por el proceso de simplificación, armonización y globalización.

La conservación del sonido de las campanas de una iglesia, de la atmósfera reverberante en un casco urbano histórico, del sentido de tranquilidad y silencio en un claustro, de las voces de los comerciantes en un mercado histórico, el sonido de una embarcación tradicional, puede ser tan atractiva para los turistas y tan importante para la comunidad local y mundial como la restauración del campanario, de las pinturas de la iglesia, de los revoques del claustro y de las fachadas de los edificios a lo largo de la calle que alberga el mercado histórico.

Una de las singularidades del concepto de patrimonio cultural inmaterial, que dificulta su reconocimiento, es su variabilidad temporal, es decir, la posibilidad de que las características reconocidas y sentidas por la población se modifiquen a lo largo de los años a medida que el entorno, la sociedad y la cultura cambian [52-56]. Por dicha razón es importante identificar, catalogar, y analizar ambientes acústicos susceptibles de ser protegidos, informar y consultar a la población sobre ello, analizar y detectar posibles amenazas que comprometan su calidad y, llegado el caso, actuar para garantizar su protección.

2. METODOLOGÍA

Entre 2018 y 2020 se desarrolló un proyecto de investigación en el que se llevó a cabo la caracterización de los paisajes sonoros más característicos de la isla de Menorca mediante algunos de los parámetros psicoacústicos y descriptores de calidad sonora actualmente definidos en las normas internacionales ISO 12913, partes 1 y 2. En el proyecto se generó una base de datos de audio y video en ambientes urbanos y rurales, generando un total de 289 registros de audio, video y parámetros acústicos obtenidos con un analizador de espectro. Todos los registros fueron geolocalizados y se obtuvieron una serie de indicadores acústicos y psicoacústicos: sonoridad, nivel de sonoridad y

percentiles asociados, L_{Aeq} , y niveles presión sonora en bandas de 1/3 de octava (dB). Con todos estos registros la información se organizó en una base de datos y posteriormente se seleccionó una muestra de 60 registros con los que se trabajó en la clasificación de ambientes sonoros siguiendo la taxonomía propuesta por Brown, entrenando y validando un clasificador basado en técnicas de aprendizaje automático. En paralelo se desarrolló una metodología para la evaluación subjetiva de paisajes sonoros por parte de 22 oyentes voluntarios, seleccionando una muestra de 6 audios representativos de ambientes sonoros urbanos de la isla de Menorca obtenidas en dos emplazamientos distintos en 3 épocas del año diferente: invierno, verano y fiestas patronales.

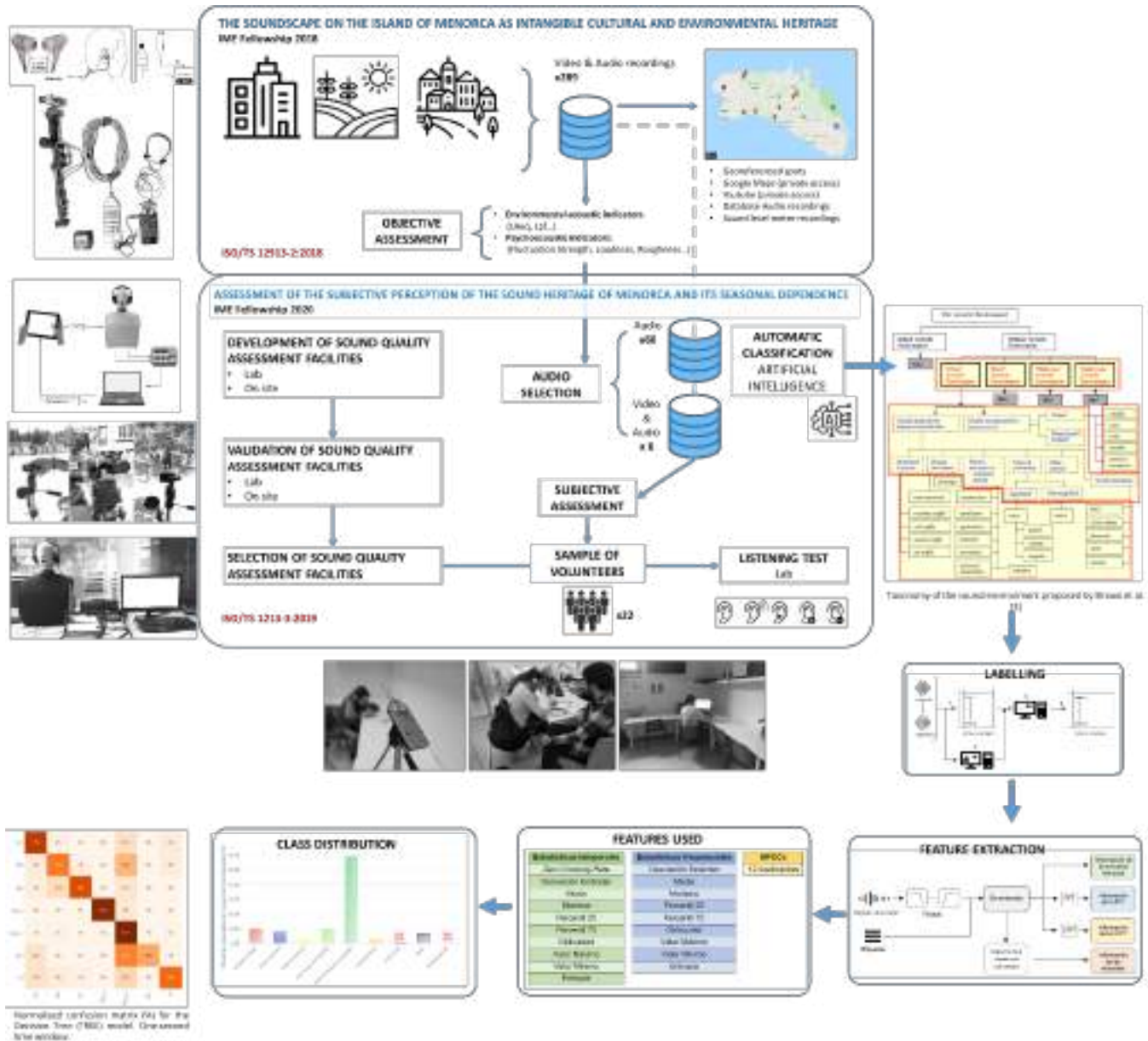


Figura 1. Resumen del proyecto.

Para realizar la evaluación subjetiva de paisajes sonoros se realizaron pruebas de escucha en laboratorio, utilizando un sistema de realización de encuestas basado en PC, mediante el uso de dos monitores, mostrando al usuario una aplicación para responder a formularios basada en Google Forms y un sistema de reproducción de audio y/o video.

Cada sujeto debía superar previamente una prueba audiométrica para garantizar que su audición era correcta y poder realizar a continuación los experimentos. Para las pruebas audiométricas se utilizó la aplicación hearWHO desarrollada por la Organización Mundial de la Salud.

Para la realización de las pruebas audiométricas se dispuso de una sala con bajo ruido de fondo, un teléfono móvil con la aplicación instalada y unos auriculares de respuesta plana. El nivel de ruido de la sala se monitoriza mediante un sonómetro con la finalidad de invalidar aquellas audiometrías que hubieran sido realizadas con niveles sonoros elevados. Una vez realizada la audiometría se completa el cuestionario de valoración para un conjunto de seis audios seleccionados de la base de datos.

Los audios se corresponden con las ciudades de Maó y Ciutadella en períodos de invierno verano y festividades de verano. Se realizaron dos tipos de experimentos: a unos usuarios se les mostró únicamente el audio, pudiéndolo reproducir tantas veces como quisieran, rellenando los cuestionarios de valoración únicamente con la información auditiva. A otros usuarios se les presentó el audio y el video para qué pudieran responder al cuestionario, al igual que en el caso anterior, permitiéndoles reproducir el audio y video tantas veces como quisieran.

Todos los audios fueron debidamente tratados para reproducirse con la misma ganancia con la que fueron grabados garantizando el nivel de calibración. La calibración se realizó mediante un sistema de simulador de cabeza y torso registrando los niveles sonoros emitidos por los auriculares analizando los resultados en un sistema de análisis multicanal.

Es importante destacar que en este experimento los usuarios no pueden variar el volumen de escucha, teniendo todos los usuarios el volumen fijado al nivel de calibración.

3. RESULTADOS

En este apartado, se presentan una muestra de resultados preliminares de la valoración de los seis audios seleccionados de los paisajes sonoros de distintos contextos de la isla de Menorca. Para ello, se realiza una comparación entre las respuestas de los encuestados que únicamente utilizaron el audio frente a aquellas respuestas obtenidas de encuestas que utilizaron el audio y el video de los paisajes sonoros.

En las siguientes figuras se ilustran las puntuaciones sobre el modelo de Axelsson de las encuestas para uno de los paisajes sonoros realizados en la Ciutadella en invierno, verano y el periodo festivo local. En estas gráficas se ha representado con una X roja los resultados de las encuestas

en las que se empleó únicamente audio, mientras que se ha utilizado un círculo (O) azul para los resultados en los que se empleó la combinación audio y video.

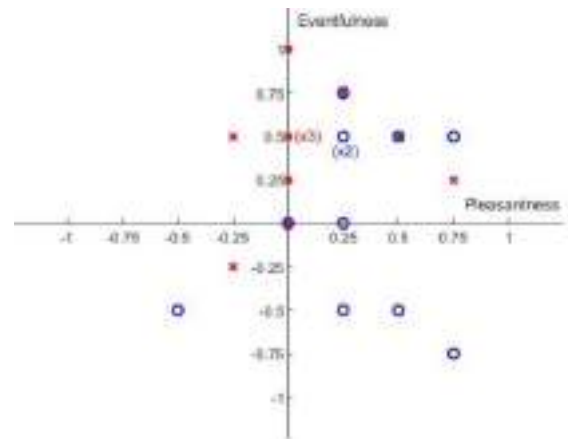


Figura 2. Evaluación en Ciutadella – invierno

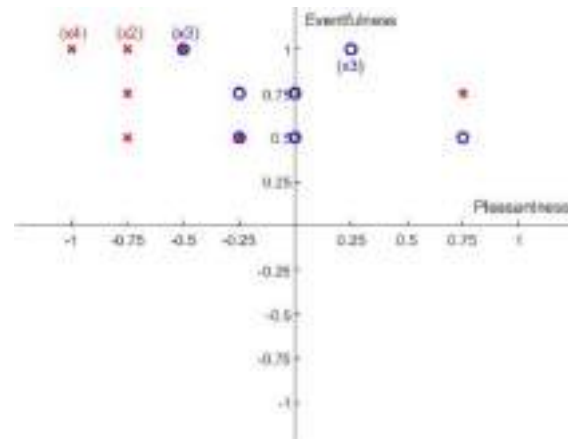


Figura 3. Evaluación en Ciutadella – verano

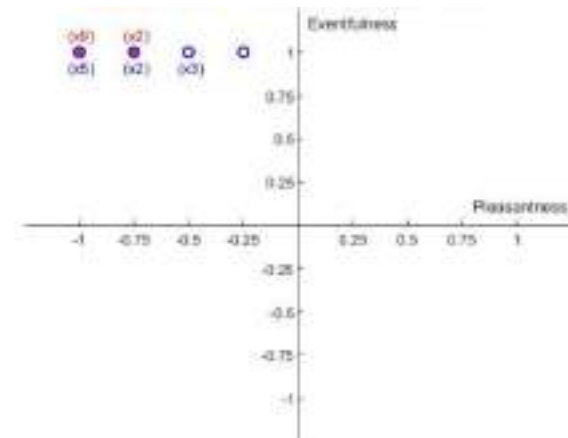


Figura 4. Evaluación en Ciutadella - período festivo.

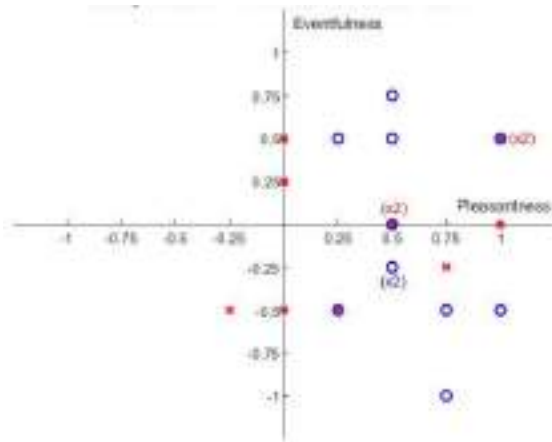


Figura 5. Evaluación en Maó – invierno

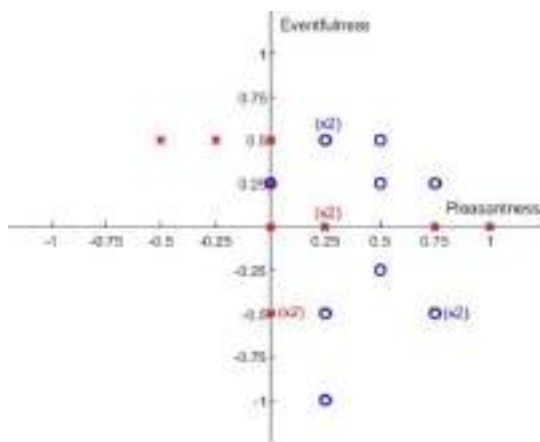


Figura 6. Evaluación en Maó – verano

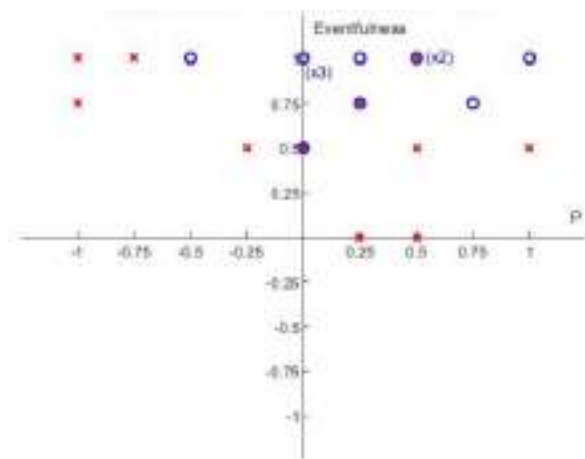


Figura 7. Evaluación en Maó - festivo

Los resultados preliminares sugieren que las encuestas en las que se empleó video y audio tienen una tendencia a presentar unos valores de *pleasantness* mayores que aquellas que utilizaron únicamente el audio. En cambio, no se observa una

tendencia clara para la evolución del *eventfulness* entre ambos modelos de encuestas.

Además, se puede observar que la evaluación en el período festivo en ambas localizaciones presenta una tendencia similar, circunstancia que se produce de igual manera para la etapa invernal. En cambio, las evaluaciones de los paisajes sonoros en verano son bastante diferentes para cada una de las dos localizaciones de estudio entre sí.

Actualmente seguimos en la fase de realización de encuestas. Se tiene prevista la realización de un total de 60 encuestas por lo que los datos aquí presentados son preliminares y únicamente reflejan los resultados de 22 individuos. Los datos deben ser analizados estadísticamente para poder extraer conclusiones sólidas.

Esta publicación es parte del Proyecto “Evaluación de la percepción subjetiva del patrimonio sonoro de Menorca y su dependencia estacional”, financiado por una beca de investigación del Institut Menorquí d'Estudis, publicada en el BOIB Núm. 198 de 21 de noviembre de 2020.

4. REFERENCIAS

- [1] ISO TC 43/SC 1/WG 54, 12913-1 Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework, (2013).
- [2] J. L. Bento-Coelho, A paisagem sonora como instrumento de design e engenharia em meio urbano, Proceedings of XXIII Encontro Da Sociedade Brasileira de Acústica, 2010.
- [3] M. Adams, T. Cox, G. Moore, B. Croxford, M. Refaee, S. Sharples, Sustainable soundscapes: noise policy and the urban experience, *Urban Studies*, 43 (2006), 2385–2398.
- [4] P. Jennings, R. Cain, A framework for improving urban soundscapes, *Applied Acoustics*, 74 (2013), 293–299.
- [5] J. Kang, From understanding to designing soundscapes, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 4 (2010), 403–417.
- [6] A.L. Brown, Soundscape planning as a complement to environmental noise management, *Noise News International*, 23 (2015), 62-69.
- [7] J.L. Bento Coelho, N. Remy, K. Vogiatzis, Urban Sound Planning in the City Centre of Thessaloniki, ICSV 2015 – 22nd International Congress of Sound and Vibration, 2015, 12–16.
- [8] N. Remy, K. Vogiatzis, Soundscape & Land Uses Management as comprehensive environmental protection action policy tool within the strategic environmental noise mapping in Greece, ICSV 2016 - 23rd International Congress of Sound and Vibration, 2016, 1–8.
- [9] W.J. Davies, M.D. Adams, N.S. Bruce, R. Cain, A. Carlyle, P. Cusack, D.A. Hall, K.I. Hume, A. Irwin, P. Jennings, M. Marselle, C.J. Plack, J. Poxon, Perception of soundscapes: An interdisciplinary approach, *Applied Acoustics*. 74 (2013), 224–231.

- [10] W.J. Davies, M.D. Adams, N.S. Bruce, M. Marselle, R. Cain, P.A. Jennings, J. Poxon, A. Carlyle, P. Cusack, D.A. Hall, A. Irwin, K.I. Hume, C.J. Plack, he Positive Soundscape Project: A synthesis of results from many disciplines, Proceedings of 38th International Congress Exposition on Noise Control Engineering InterNoise 2009, (2009, Ottawa, Canada), 2009, 663–672.
- [11] B. Schulte-Fortkamp, Jian Kang. Introduction to the special issue on soundscapes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 134, 765 (2013);
- [12] T. Stockelt (1991) Sound as an existential necessity. *Journal of Sound and Vibration* 151, 367-370.
- [13] Botteldooren, D., De Coensel, B., & De Muer, T. (2006) The temporal structure of urban soundscapes. *Journal of Sound and Vibration* 292, 105-123.
- [14] A.L. Brown, J. Kang, T. Gjestland, Towards standardization in soundscape preference assessment, *Applied Acoustics*, 72 (2011), 387–392.
- [15] I. Van Kamp, R. Klæboe, A.L. Brown, P. Lercher, Soundscapes, Human Restoration and Quality of life, In J. Kang, B. SchulteFortkamp (Eds.), *Soundscape Built Environ*, CRC Press, 2016, 43–68.
- [16] P. Lercher, I. Van Kamp, E. Von Lindern, D. Botteldooren, Perceived Soundscapes and Health-Related Quality of Life, Context, Restoration, and Personal Characteristics, In J. Kang, B. Schulte-Fortkamp (Eds.), *Soundscape Built Environ*, CRC Press, 2016, 133–160.
- [17] Francesco Aletta, Jieling Xiao. What are the Current Priorities and Challenges for (Urban) Soundscape Research?. *Challenges* 2018, 9, 16;
- [18] A.L. Brown, T. Gjestlan, D. Dubois, Acoustics Environments and soundscapes, In J. Kang, B. Schulte-Fortkamp (Eds.), *Soundscape Built Environ.*, 2016, 1–16.
- [19] P. Schomer, A.L. et. Al. On efforts to standardize a graphical description of the soundscape concept, Proceeding 39th International Congress Exposition on Noise Control Engineering Inter-Noise 2010, (Lisbon, Portugal), 1–8.
- [20] Ö. Axelsson, M.E. Nilsson, On sound source identification and taxonomy in soundscape research, Proceeding 39th International Congress Exposition on Noise Control Engineering Inter-Noise 2010, (Lisbon, Portugal) 5231-5235.
- [21] J.L. Bento-Coelho, Approaches to Urban Soundscape Management, Planning and Design, In J. Kang, B. Schulte-Fortkamp (Eds.), *Soundscape Built Environ*, CRC Press, 2016, 197–214
- [22] K. Genuit, A. Fiebig, Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach, *Acta Acustica United with Acustica*, 92 (2006), 952–958.
- [23] D.A. Hall, A. Irwin, M. Edmondson-Jones, S. Phillips, J.E.W. Poxon, An exploratory evaluation of perceptual, psychoacoustic and acoustical properties of urban soundscapes, *Applied Acoustics*. 74 (2013), 248–254.
- [24] A. Maristany, M. Recuero López, C. Asencio Rivera, An exploratory evaluation of perceptual, psychoacoustic and acoustical properties of urban soundscapes, *Applied Acoustics*. 111 (2016), 106–115.
- [25] B. Szeremeta, P.H.T. Zannin, Analysis and evaluation of soundscapes in public parks through interviews and measurement of noise, *Science Total Environment*, 407 (2009), 6143–6149.
- [26] Ö. Axelsson, M.E. Nilsson, B. Berglund, A principal components model of soundscape perception, *Journal of the Acoustical Society of America*, 128 (2010), 2836–2846.
- [27] R. Cain, P. Jennings, J. Poxon, The development and application of the emotional dimensions of a soundscape, *Applied Acoustics*, 74 (2013), 232–239. [24] J. Guillén, I. López, Importance of personal, attitudinal and contextual variables in the assesment of pleasantness of the urban sound environment, *Proceedings 19 International Congress on Acoustics (2007, Madrid, Spain)*, 2007, 2–7.
- [28] K. Kawai, T. Kojima, K. Hirate, M. Yasuoka, Personal evaluation structure of environmental sounds: Experiments of subjective evaluation using subjects' own terms, *Journal Sound and Vibration*, 277 (2004), 523–533.
- [29] I. López, J. Guillén, Calidad acústica urbana: influencia de las interacciones audiovisuales en la valoración del ambiente sonoro, *Medio Ambiente y Comportamiento Humano*, 6 (2005), 101–117.
- [30] J.Y. Jeon, P.J. Lee, J.Y. Hong, D. Cabrera, Non-auditory factors affecting urban soundscape evaluation, *Journal of the Acoustic Society of America*, 130 (2011), 3761–3770.
- [31] R. Pheasant, K. Horoshenkov, G. Watts, B. Barrett, The acoustic and visual factors influencing the construction of tranquil space in urban and rural environments tranquil spaces-quiet places?, *Journal of the Acoustic Society of America*, 123 (2008), 1446– 1457.
- [32] J. Liu, J. Kang, T. Luo, H. Behm, Landscape effects on soundscape experience in city parks, *Science of the Total Environments*, 454–455 (2013), 474–481.
- [33] Hermida Cadena, Luis Fernando, Lobo Soares, Antonio Carlos, Pavón, Ignacio, Coelho, Luis Bento. Assessing soundscape: Comparison between in situ and laboratory methodologies- *Noise Mapping* 2017; 4:57–66.
- [34] Institut Menorquí d'Estudis. Observatori Socioambiental de Menorca. Indicadors Bàsics. VI.a.2.1. Població estacional. La pressió humana diària. Dades diàries. <http://www.obsam.cat/>
- [35] Instituto de Estudios Sociales Avanzados. *Ecobarómetro Balear*. 5ª edición. 23 de septiembre de 2017. https://www.tirme.com/upload/424pdf_file12_09_34.pdf
- [36] Institut Menorquí d'Estudis. Observatori Socioambiental de Menorca. Agencia Menorca Reserva de Biosfera. Menorca RB+25. Encuesta de percepción ciudadana. OBSAM. Marzo 2018. <http://www.obsam.cat/>
- [37] Clark, C.; Paunovic, K. Who environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and quality of life, wellbeing and mental health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, doi:10.3390/ijerph15112400.

- [38] Medvedev, O.; Shepherd, D.; Hautus, M.J. The restorative potential of soundscapes: A physiological investigation. *Appl. Acoust.* 2015, 96, doi:10.1016/j.apacoust.2015.03.004.
- [39] Hermida, L.; Pavón, I.; Lobo Soares, A.; Bento-Coelho, J. On the Person-Place Interaction and Its Relationship with the Responses/Outcomes of Listeners of Urban Soundscape (Compared Cases of Lisbon and Bogotá): Contextual and Semiotic Aspects. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 1–21, doi:10.3390/ijerph16040551.
- [40] Kang, J.; Aletta, F.; Gjestland, T.T.; Brown, L.A.; Botteldooren, D.; Schulte-forkamp, B.; Lercher, P.; Kamp, I. Van; Genuit, K.; Luis, J.; et al. Ten q of the built environment. *Build. Environ.* 2016, 1–11, doi:10.1016/j.buildenv.2016.08.011.
- [41] [ITP Berlin 2018] PRESS RELEASE. 25th World Travel Monitor® Forum in Pisa: International travel industry needs new strategies to manage ‘overtourism’. ITB Berlin 7 to 11 March 2018.
- [42] Frantzeskakis J., Vogiatzis C., Hatzopoulou A., Aravantinos A. et al. NTUA Programme for Noise Abatement in Tourist Areas Final report. Dept. of Transportation Planning and Engineering of the NTUA, for the Ministry of Environment, Planning and Public Works, Direction of Air Pollution and Noise Control, Section of Noise Abatement, October 1999
- [43] Stefan Gössling & Paul Peeters (2015) Assessing tourism's global environmental impact 1900–2050, *Journal of Sustainable Tourism*, 23:5, 639-659, DOI: 10.1080/09669582.2015.1008500
- [44] Auge, M. *Los no lugares. Espacios del anonimato*; Gedisa: Barcelona, Spain, 2009; ISBN 9788474324594.
- [45] Deng Z, Kang J, Wang D, Liu A, Kang JZ. Linear multivariate evaluation models for spatial perception of soundscape. *J Acoust Soc Am.* 2015;138:2860–70. doi:10.1121/1.4934272.
- [46] Luis Fernando Hermida Cadena (2019) “Desarrollo de un modelo de evaluación de paisajes sonoros según aspectos espaciales, temporales, subjetivos y de contexto”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [47] Vogiatzis, Konstantinos & Psichas, K. & Chaikali, S. (2001). Environmental noise as a design parameter in urban tourist areas in Greece - A social, technical & legal approach. *Acoust Tech.* 41-49.
- [48] Ana Trancoso González. Venice: the problem of overtourism and the impact of cruises. *Investigaciones Regionales – Journal of Regional Research*, 42 (2018) – Pages 35 to 51.
- [49] Parlamento Europea. Policy Department for Structural and Cohesion Policies Directorate-General for Internal Policies. Research for TRAN Committee - Overtourism: impact and possible policy responses. PE 629.184 - October 2018
- [50] Julia Buckley, CNN. Destinations have vowed to fight back against overtourism for 2020. Published 23rd January 2020. <https://edition.cnn.com/travel/article/overtourism-europe-2020-destination-measures/index.html>
- [51] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. UNESCO. Convención para la salvaguardia del patrimonio cultural inmaterial 2003. Paris, 17 de octubre de 2003
- [52] Brambilla G., Maffei L. (2010). Perspective of the soundscape approach as a tool for urban space design. *Noise Control Eng. J.*, 58(5), 532–539.
- [53] Brambilla G., De Gregorio L., Maffei L., Masullo M. (2007a). Soundscape in the archeological area of Pompei. Presented at Proceedings of 19th International Congress on Acoustics (ICA), Madrid, Spain, paper ENV-10-002.
- [54] Brambilla G., De Gregorio L., Maffei L., Yuksel Can Z., Ozcevik A. (2007b). Comparison of the soundscape in the historical centres of Istanbul and Naples. Presented at Proceedings of the 36th International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2007, Istanbul, Turkey, paper IN07-334.
- [55] Raichel D. R., Brooks B. M., Lubman D. (2004). Archaeological acoustics: A guide to trends in community noise levels. *J. Acoust. Soc. Am.*, 115(5), 2622.
- [56] Brambilla G., Maffei L. (2011). Soundscape heritage: An evolving value to preserve and archive? Presented at Think Tank: Soundscape as a Part of Cultural Heritage [organized and supported by COST Action TD0804], Capri, Italy.

PAISAJE SONORO EN JARDINES BOTÁNICOS URBANOS

Guillermo Rey-Gozalo^{1*}
David Montes González¹
Carlos Iglesias-Merchan²
Juan Miguel Barrigón Morillas¹
Rosendo Vilchez-Gómez¹

¹Lambda, Departamento de Física Aplicada, INTERRA, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura, Avda. de la Universidad s/n, 10003 Cáceres, España

²Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, E.T.S.I. Montes, Forestal y Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

RESUMEN

El paisaje sonoro de los jardines botánicos urbanos no es una característica que suele ser prioritaria en su diseño, mantenimiento e, incluso, en la mayoría de los casos, tampoco es considerado en el proceso de evaluación de la satisfacción de sus usuarios. La conservación y la diversidad de especies vegetales de los jardines botánicos es un factor que habitualmente contribuye positivamente en la percepción de sus características; sin embargo, merece la pena plantearse si su entorno sonoro puede ser un aspecto que influya sobre la percepción y la satisfacción de sus visitantes, especialmente teniendo en cuenta las actividades frecuentes de aprendizaje y reconocimiento de especies vegetales que se llevan a cabo en estos jardines. En el presente trabajo se analizaron los entornos sonoros del Real Jardín Botánico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y del Real Jardín Botánico Alfonso XIII de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Para ello, se llevaron a cabo, simultáneamente, registros sonoros y encuestas a los usuarios. Un estudio de su estado fue también realizado considerando las parejas de adjetivos sugeridas en la ISO 12913. Los resultados muestran que el entorno sonoro en estas áreas verdes urbanas es una característica que puede ser relevante en la percepción global de sus visitantes.

ABSTRACT

The soundscape of urban botanical gardens is not a feature that is usually prioritized in their design, maintenance and, in most cases, it is not even considered in the process of evaluating user satisfaction. The conservation and diversity of

plant species in botanical gardens is a factor that usually contributes positively to the perception of their characteristics; however, it is worth considering whether their sound environment can be an aspect that influences the perception and satisfaction of visitors, especially considering the frequent learning and recognition activities of plant species that take place in these gardens. In this study, the soundscapes of the CSIC - Real Jardín Botánico and the Real Jardín Botánico Alfonso XIII of the Universidad Complutense de Madrid were analyzed. To do this, sound recordings and surveys of users were carried out simultaneously. A study of its state was also conducted considering the pairs of adjectives suggested in ISO 12913. The results show that the sound environment in these urban green areas is a feature that can be relevant in the overall perception of visitors.

Palabras Clave— Áreas verdes urbanas, paisaje sonoro, ruido urbano.

1. INTRODUCCIÓN

La relación entre las áreas verdes urbanas y los beneficios en la salud y la calidad de vida ha sido mostrada en una amplia variedad de estudios realizados en diferentes ciudades y países. De hecho, la Organización Mundial de la Salud, publicó un informe en el año 2016, *Urban green spaces and health*, donde hace una recopilación de resultados y estudios relacionados con esta temática [1]. Sin embargo, a pesar de la constatación de esta relación, no está tan claro cuáles son las variables influyentes y cuál es su grado de contribución en esta relación [2]. Gran parte de la investigación se ha centrado en los estímulos visuales que producen las áreas verdes, pero, el entorno sonoro también es una característica importante. La

* **Autor de contacto:** guille@unex.es

Copyright: ©2023 G. Rey-Gozalo et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

mayoría de las áreas verdes urbanas han sido diseñadas sin considerar la calidad del entorno sonoro. Los jardines japoneses presentan una alta satisfacción debido a la consideración del sonido y otras experiencias sensoriales [3].

Considerando lo anterior, en este estudio, se planteó el objetivo general de analizar el entorno sonoro de jardines botánicos donde hay un especial cuidado de las especies vegetales y, en general, de su entorno estético. Además, la diversidad de especies vegetales muestra una asociación positiva con la percepción de los entornos verdes [4]. Dentro de este objetivo general, se planteó como objetivo específico: analizar la interacción entre la satisfacción con la estética del entorno, con el entorno sonoro y con la satisfacción global con las características de los jardines. Otro de los objetivos específicos fue analizar el entorno sonoro tanto desde el punto de vista físico - objetivo, como también desde el punto de vista subjetivo (paisaje sonoro). Para evaluar el paisaje sonoro se siguieron las recomendaciones de la ISO/TS 12913-2.

Las áreas verdes urbanas son espacios públicos donde los usuarios llevan a cabo actividades que pueden tener beneficios en la salud y calidad de vida. Además, los jardines botánicos son áreas para el conocimiento y aprendizaje de las diferentes especies vegetales. La calidad del entorno sonoro puede influenciar en el desarrollo de estas actividades. Por lo tanto, también en este estudio se estudió el efecto del ruido en las actividades que, principalmente, desarrollaban los usuarios en los jardines botánicos.

2. METODOLOGÍA

El Real Jardín Botánico (RJB-CSIC) y el Real Jardín Botánico (RJB) de Alfonso XIII (Universidad Complutense de Madrid) fueron seleccionados para este estudio. Ambos se localizan en la ciudad de Madrid con una extensión de 6 y 8 ha, respectivamente (Figura 1). El RJB Alfonso XIII se localiza en el distrito municipal Moncloa-Aravaca y su acceso es gratuito. Sin embargo, El RJB-CSIC está ubicado en el distrito Retiro y el acceso tiene un coste económico, aunque los martes de 10:00 a 13:00 es de acceso gratuito.



Figura 1. Localización de los jardines botánicos analizados

Se localizaron diferentes puntos de muestreo en los jardines botánicos considerando los diferentes entornos acústicos existentes (5 puntos en RJB-CSIC y 4 puntos en el RJB-Alfonso XIII). Mediciones, grabaciones binaurales y encuestas se realizaron simultáneamente en diferentes periodos horarios durante el día. Se descartó algún evento sonoro anómalo y puntual durante la caracterización de estos entornos sonoros [5, 6]. Las mediciones fueron realizadas con un sonómetro de tipo 1 siguiendo las recomendaciones de la ISO 1996-2 con respecto a la localización, condiciones de entorno y tiempo de medida [7]. Se utilizó la ISO/TS 12913-2 como referencia para las grabaciones binaurales y encuestas. La encuesta incluía las preguntas respectivas al paisaje sonoro recomendadas en esta normativa, pero también otras relacionadas con los efectos negativos del ruido que han sido analizadas en estudios previos [8]. Se utilizó una escala de valoración impar de 11 ítems (0 – 10) excepto para la valoración de los adjetivos que describen el paisaje sonoro que fue de 9 ítems (1 – 9). Los participantes de la encuesta aceptaron un consentimiento informado de acuerdo a la Declaración de Helsinki y su contenido fue aprobado por el comité de ética y bioética de la Universidad de Extremadura (referencia 47//2023)

Una muestra preliminar de las encuestas realizadas se analiza en este estudio: 50 encuestas del RJB-CSIC y 30 encuestas del RJB – Alfonso XIII. Con respecto a los indicadores acústicos, sólo se muestran los resultados obtenidos para el nivel de presión sonora equivalente (L_{Aeq}).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los valores medios obtenidos en las preguntas respectivas a la satisfacción por la estética, entorno sonoro y para el global de las características se muestran en la Tabla 1. La satisfacción de los usuarios a estas características, considerando la escala utilizada de 0 – 10, es bastante buena en ambos jardines botánicos. Era un resultado esperable considerando el mantenimiento y cuidado de estos espacios verdes. A pesar de los buenos valores de satisfacción en ambos parques, la estética y el entorno sonoro del RJB – CSIC es significativamente mejor valorada que en el RJB – Alfonso XIII como se muestra en la Figura 2 (p -valor < 0,05 según U de Mann-Whitney). Ahora bien, si se consideran la totalidad de características de ambos jardines, los valores medios de la satisfacción de los usuarios no presentan diferencias significativas, como se muestra en la Figura 3 (p -valor > 0,05 según U de Mann-Whitney). La mayor cantidad y diversidad de especies vegetales y el mayor cuidado y mantenimiento pueden haber influido en esta valoración visual de estos entornos. Con respecto al entorno sonoro, los valores sonoros registrados en ambos jardines son similares (p -valor > 0,05 según la U de Mann-Whitney), e incluso un poco superiores para el RJB – CSIC, como se muestra en la Figura 4.

Los usuarios presentan mayor satisfacción por la estética de los jardines que por el entorno sonoro. Esta mayor satisfacción sólo es significativamente mayor en el caso del RJB-CSIC (p -valor $< 0,05$ según U de Mann-Whitney). El cuidado de estos jardines se centra, principalmente, en la conservación de especies vegetales y, aunque la presencia de vegetación y fuentes de agua puede beneficiar a una mayor presencia de fuentes sonoras naturales, la calidad del entorno sonoro no es un objetivo principal de estos jardines.

Tabla 1. Valores medios obtenidos para la percepción de la estética, sonidos y global de las características de los jardines botánicos

Parque	Estadístico	Global	Estética	Sonidos
RJB CSIC	Mediana	8,0	9,0	8,0
	Promedio	8,3	8,4	7,8
RJB Alfonso XIII	Mediana	8,0	7,5	7,0
	Promedio	7,7	7,1	6,6

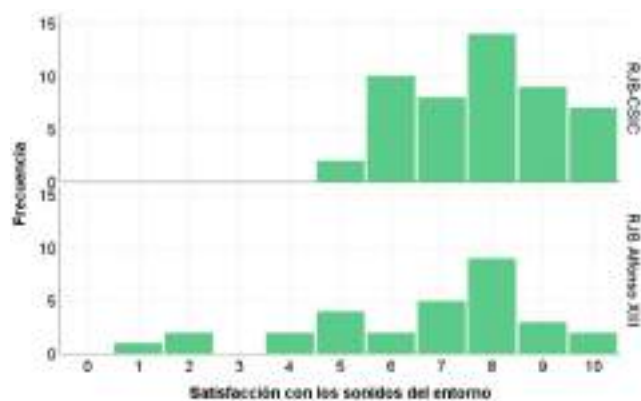


Figura 2. Satisfacción con el entorno sonoro de los jardines botánicos

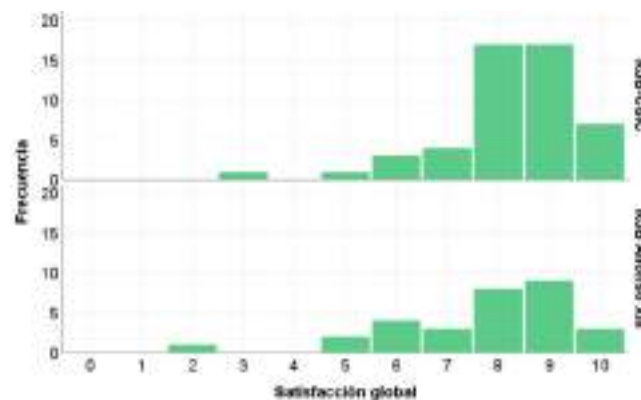


Figura 3. Satisfacción global con las características de los jardines botánicos

A continuación, se analizó la relación entre las diferentes características evaluadas, estética y sonidos, con respecto a la satisfacción global, a través del coeficiente de correlación Rho de Spearman. Una mayor correlación obtuvo la característica estética en ambos jardines con respecto a la satisfacción global (Tabla 2); aunque ambos coeficientes de correlación son muy significativos, lo que denota la importancia de ambos entornos (visual y sonoro) en la valoración de la satisfacción global proporcionada por estas áreas verdes.

Hay que tener cuidado a la hora de establecer una relación de causa efecto cuando sólo se considera una única variable, pues en esta relación puede haber otras variables que actúen de moderadores. Por ello, se llevó a cabo una correlación parcial utilizando la variable sonido o estética como moderadora. Los resultados presentados en la Tabla 2 muestran una interacción significativa entre ambas variables y el efecto significativo que tiene una sobre la otra. Por lo tanto, el efecto de estas dos variables (visual y sonora) deben ser consideradas simultáneamente si se desea cuantificar de forma adecuada su efecto sobre la percepción global; aunque los resultados indican que, en estos jardines botánicos, la variable estética tiene mayor relevancia que el entorno sonoro a la hora de valorar globalmente las características del jardín. No obstante, el efecto del entorno sonoro es muy significativo, por lo que se debería considerar si queremos mejorar o conservar la satisfacción de estas áreas verdes.

Tabla 2. Coeficiente de correlación Rho de Spearman obtenido de las relaciones entre la satisfacción con la estética, sonidos y global de las características para ambos jardines botánicos.

Parque	Rho	Estética	Sonidos
RJB CSIC	Global	0,722***	0,633***
RJB Alfonso XIII		0,669***	0,646***
		Estética (- Sonidos)	Sonidos (- Estética)
RJB CSIC		0,509***	0,366**
RJB Alfonso XIII		0,440*	0,386*

*** p -valor $< 0,001$

** p -valor $< 0,01$

* p -valor $< 0,05$

El análisis del entorno sonoro, desde el punto de vista objetivo y subjetivo, era otro de los hitos del presente estudio. La Figura 4 muestra que el mayor porcentaje de valores sonoros registrados, en ambos parques, están en torno a 50 – 53 dBA. Si bien no superan el límite de los 53 dBA considerado por la Organización Mundial de Salud (OMS) para el tráfico rodado [9], están por encima de los 45 dBA recomendados

para los entornos silenciosos por la Agencia Europea de Medio Ambiente [10].

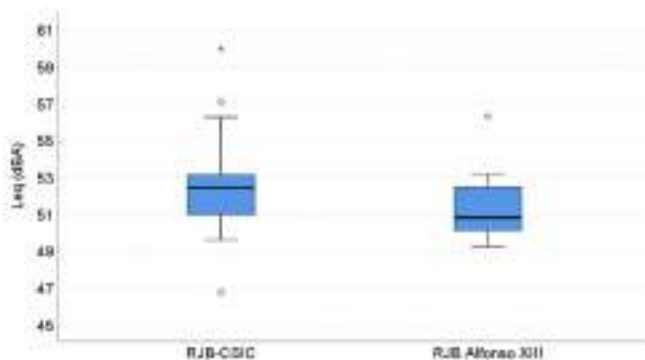


Figura 4. Niveles sonoros registrados durante el periodo diurno en ambos jardines botánicos.

A diferencia de otros entornos urbanos, en estos jardines botánicos, las fuentes sonoras naturales y las personas, a pesar de que no hay grandes diferencias, son oídas con más frecuencia que el tráfico rodado, como se muestra en la Figura 5. De todas maneras, el tráfico rodado es también frecuentemente oído por los usuarios. El tráfico rodado es una fuente de ruido omnipresente en todas las ciudades [11, 12].

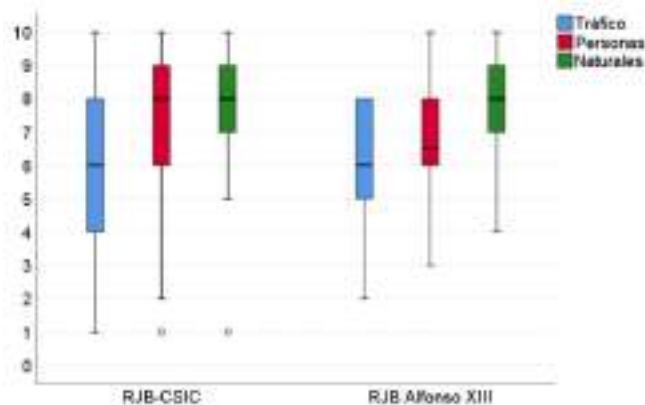


Figura 5. Valoración de 0 a 10 según se oyen las fuentes sonoras del tráfico, personas y naturales.

Con respecto a los adjetivos propuestos en la ISO/TS 12913-2, estos entornos son valorados como lleno de sucesos, excitante, estable, calmado y agradable (Figura 6). Considerando un valor medio, estaría entre los adjetivos calmado y agradable. Resultados promedios similares se han obtenido en estudios anteriores realizados en parques de la ciudad de Cáceres [13]. Sin embargo, a diferencia de estos estudios previos, hay una mayor dispersión en las valoraciones de los usuarios en estos jardines botánicos.

Finalmente, con respecto al paisaje sonoro, se les preguntó a los usuarios para que valoraran si estos entornos sonoros los consideraban de gran calidad. El valor medio otor-

gado al entorno sonoro del RJB-CSIC (7,5) fue significativamente superior al del RJB – Alfonso XIII (6,3). La Figura 7 muestra también una mayor variabilidad en las valoraciones en el RJB – Alfonso XIII, asignando, algunos usuarios, valoraciones muy bajas a este entorno sonoro.

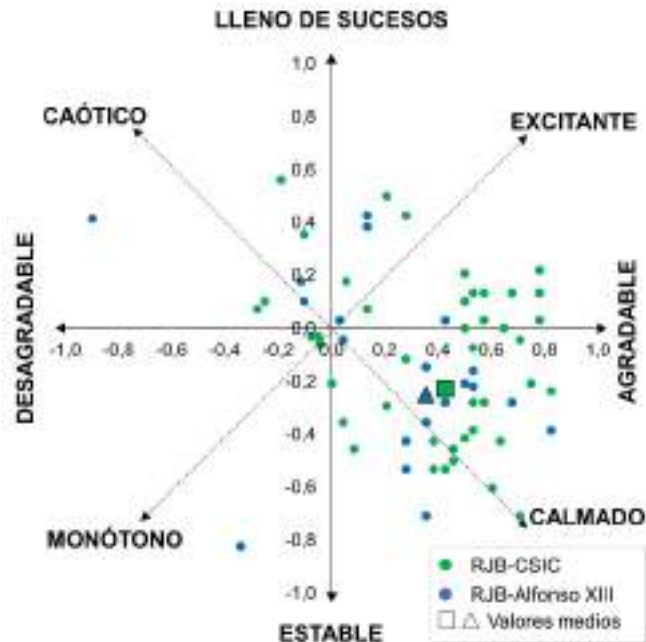


Figura 6. Análisis de las dimensiones del paisaje sonoro según la ISO/DIS 12913-2.

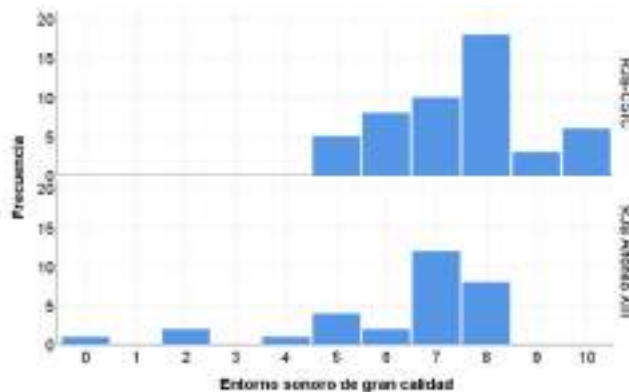


Figura 7. Valoración de 0 a 10 si el entorno sonoro del jardín botánico es de gran calidad

El último objetivo de este trabajo, dado el efecto que puede tener el uso que hacen los usuarios de las áreas verdes en su salud y bienestar, fue analizar la frecuencia de diferentes actividades y el efecto del ruido sobre ellas. La Figura 8 muestra cómo las principales actividades, en ambos parques, son relajarse, pasear e ir a conocer especies vegetales. Las actividades de relajación o de aprendizaje implican una necesidad de

los usuarios de estar expuestos a un nivel de ruido lo suficientemente bajo como para que no interfiera negativamente en su desarrollo. La Figura 9 muestra cómo las actividades de relajación y de pasear son las más afectadas por el ruido. Sin embargo, las explicaciones de los guías botánicos no se ven afectadas por el ruido. Quizás, las explicaciones de los guías o las conversaciones de los usuarios, fuente sonora frecuente en estos entornos, como mostraba la Figura 5, interfieran en la percepción del entorno de los usuarios cuando estos sólo van a realizar actividades de relajación y de paseo. Los valores de molestia a la actividad de relax son intermedios. Por ello, sería importante llevar algunas acciones para mejorar el entorno sonoro en estos aspectos.

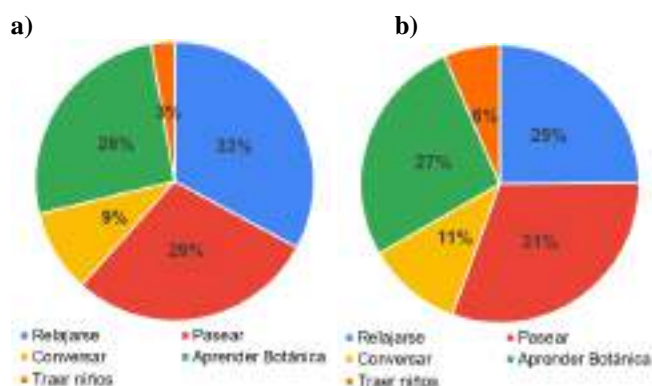


Figura 8. Actividades que llevan a cabo los usuarios en el RJB-Alfonso XIII (a) y en el RJB-CSIC (b)

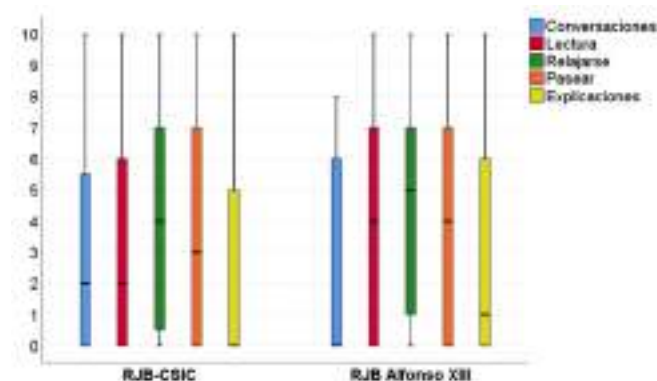


Figura 9. Grado de molestia del ruido en las actividades de los usuarios de los jardines botánicos

4. CONCLUSIONES

El entorno sonoro es una característica que influye, significativamente, tanto en la percepción visual como en la valoración global de los jardines botánicos urbanos. Por ello, debería ser una característica a considerar, tanto en su diseño como en su mantenimiento.

Los niveles sonoros registrados serían aceptables si se considerase un entorno urbano donde el tráfico rodado fuera

la principal fuente sonora; sin embargo, están presentes frecuentemente fuentes naturales y, por lo tanto, dista de los 45 dBA recomendados para áreas tranquilas.

El paisaje sonoro de ambos jardines botánicos, a pesar de la variabilidad en los adjetivos otorgados por las personas encuestadas, en promedio, pueden considerarse entornos sonoros calmados y agradables.

Actividades de relajación y pasear, frecuentemente realizadas por los usuarios de estos entornos verdes, se ven afectadas, de manera intermedia, por el entorno sonoro presente. Por ello, como mejora posible de la calidad de los servicios ofrecidos por estas zonas verdes, sería adecuado tomar medidas para reducir los ruidos molestos procedentes de sus propios usuarios y del tráfico rodado.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2020-114199RA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.



Los autores quieren agradecer la ayuda y colaboración de Irene Fernández de Tejada de Garay, Nuria Prieto Ruiz, Marino Sánchez García y Nacho Ruiz del Árbol Crehuet del Real Jardín Botánico – CSIC y a Lorena María García Álvarez y Juan Carlos Marín Blanco del Real Jardín Botánico Alfonso XIII – UCM por permitirnos el acceso, ayudarnos en la realización de las encuestas y en la instalación de equipos de grabación.

6. REFERENCIAS

- [1] World Health Organization (WHO), *Urban green spaces and health*, WHO, Regional Office for Europe, Copenhagen, 2016.
- [2] K. Uebel, M. Marselle, A.J. Dean, J.R. Rhodes, A. Bonn, “Urban green space soundscapes and their perceived restorativeness,” *People and Nature*, 3, 756–769, 2021.
- [3] G. Cerwén, “Listening to japanese gardens: An autoethnographic study on the soundscape action design tool,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 23, 4648, 2019.
- [4] D. Ilie, S. Cosmulescu, “Spontaneous Plant Diversity in Urban Contexts: A Review of Its Impact and Importance,” *Diversity*, 15, 277, 2023.
- [5] D. Montes González, J.M. Barrigón Morillas, G. Rey-Gozaló, “Different types of criteria for dealing with anomalous noise events in urban environments under stable road traffic flow conditions,” *Applied Acoustics*, 204, 109241, 2023.

- [6] C. Prieto Gajardo, J.M. Barrigón Morillas, V. Gómez Escobar, R. Vílchez-Gómez, G. Rey Gozalo, “Effects of singular noisy events on long-term environmental noise measurements,” *Polish Journal of Environmental Studies*, 23, 6, 2007–2017, 2014.
- [7] D. Montes González, J.M. Barrigón Morillas, G. Rey Gozalo, “Microphone position and noise exposure assessment of building façade,” *Applied Acoustics*, 160, 107157, 2020.
- [8] D. Montes González, J.M. Barrigón Morillas, G. Rey-Gozalo, “Effects of noise on pedestrians in urban environments where road traffic is the main source of sound,” *Science of the Total Environment*, 857, 159406, 2023.
- [9] World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe, *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, 2018.
- [10] European Environment Agency (EEA), *Quiet areas in Europe – The environment unaffected by noise pollution*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016.
- [11] G. Rey Gozalo, V. Gómez Escobar, “Uncertainty evaluation of road traffic noise models in two Ibero-American cities,” *Applied Acoustics*, 180, 108134, 2021.
- [12] G. Rey Gozalo, E. Suárez, A.L. Montenegro, J.P. Arenas, J.M. Barrigón Morillas, D. Montes González, “Noise estimation using road and urban features,” *Sustainability*, 12, 9217, 2020.
- [13] G. Rey Gozalo, D. Montes González, F.J. Castellano Cifuentes, P. Atanasio Moraga, J. Pérez González, S.J. Hidalgo de Trucios, “Análisis del entorno sonoro de espacios verdes urbanos y protegidos,” en el 53º Congreso Español de Acústica, XII Congreso Ibérico de Acústica, *Tecniacústica 2022*, (Elche, España), pp. 234–242, 2022.

ROAD TRAFFIC AURALIZATION: MODELING AND SYNTHESIS OF ELECTRIC DRIVES

Christian Dreier*
Michael Vorländer

Institute for Hearing Technology and Acoustics, RWTH Aachen University, Germany

ABSTRACT

Nowadays, road traffic emissions are dominating urban sound. Beyond the scope of objective noise assessments based on weighted sound pressure levels, the consideration of the sound generation and propagation from different traffic noise sources is a future-oriented research aspect in the urban planning process. Auralizations can be used to simulate spatial sound fields in virtual environments and thus enables an assessment of perception-related environmental noise aspects. To achieve physically meaningful and perceptually plausible auralizations, individual sound sources must be precisely characterized and modeled. At the example of the increasingly important sound emission from electric drives to the urban soundscape, this paper presents a combined method for modeling and synthesizing electric drive sound radiation. A particular focus of this work is a computationally efficient implementation using C++ and its integration to a real-time road traffic sound synthesis tool.

Key words — Auralization, noise research, source characterization

1. INTRODUCTION

The importance of acoustics for the urban planning process is constantly growing. In its key publication Guidelines for community noise [1], the World Health Organization addressed the impact of noise on health based on a comprehensive systematic review. With primary focus on noise reduction in cities the approaches are manifold. They reach from emission reductions at the sound sources, the geometrical outline of urban development plans, and noise masking techniques (e.g. by installation of fountains). For the subjective evaluation of soundscapes already during the planning process, auralization in combination with visualization is a promising approach [2]. Compared to the sound emission from vehicles equipped with conventional combustion engines, electrical powertrains will seriously change the soundscape of urban environments since their

acoustical characteristics significantly differ (Table 1). Most important, the drivetrain emission reduces to a purely harmonic source spectrum and due to increased torque of electric drives, the load dependency decreases. Furthermore, the sound radiation from the electric engine's vibrating surface reduces its spatial distribution to a single source point.

Table 1: Acoustical characteristics of combustion and electrical engine drives.

Engine type	Combustion	Electric
Components	Harmonics + stochastic noise	Harmonics
Dependency	Rotational speed + Load (strong)	Rotational speed + Load (weak)
Radiation locations	Multiple, spatially distributed partial sound sources 1) Intake 2) Exhaust 3) Structural vibration	Single source

For the auralization of road traffic sound sources, the authors presented a C++-based and real-time capable synthesizer in a VST plugin format [3] by using a procedural synthesis approach. The synthesizer contains submodules for spatially distributed partial sound sources of both, combustion engines and electrical drives. Further details have been presented with focus on the inverse modeling method based on recorded vehicle pass-by sounds [4]. The sound sources are accompanied by according directivity data for according reproduction of the spatial variations of the sound emissions. Several techniques for the rendering of combustion engine sounds were proposed, e.g. by using other synthesis techniques, e.g. wavetables [5] or combined additive/subtractive synthesis approaches [6]. The change to electrical drives has led to considerable effort in research and industry to develop tools for the prediction of sound emissions based on numerical simulations along the whole

* **Autor de contacto:** christian.dreier@akustik.rwth-aachen.de

Copyright: ©2023 Christian Dreier and Michael Vorländer. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

simulation chain. It comprises from the electrical, mechanical and structural-dynamic properties of the permanent magnet synchronous machine (PMSM) over the sound-radiating surface vibrations of the engine's housing to a binaural auralization for subjective evaluation considering the indoor (rooms) or outdoor sound propagation [7]. Generally, different techniques for modelling sound source signals exist, each exhibiting certain advantages and disadvantages. Notable techniques are additive, subtractive, wavetable, granular synthesis or physical modeling [8]. Technically, they can be distinguished regarding their computational load, parameterization and generalizability.

2. SIGNAL PROCESSING CHAIN

A PMSM uses permanent magnets in the rotor and a variable frequency current traveling through the stator to generate torque. As the rotor turns, the stator uses electric currents to generate a magnetic field that follows the speed of rotation of the rotor to generate a consistent torque. The electromagnetic forces generated during its operation generate vibrations not only at the frequency of excitation but also at higher frequencies or harmonics. These variations, called higher-order harmonics, appear at multiples of the first harmonic. Since the electric engine is a periodically rotating machine its spectrogram is composed of multiple sinusoidal harmonics (Fig.3). In consequence, the sound synthesis can be achieved by using the additive synthesis technique by means of a low computational load, parameterization of the rotational speed and the possibility to modularly adapt the tool to data a specific electric engine. As shown in Fig. 1, the signal processing chain consists of an analysis step (chapter 2.1) that transforms the electric engine's sound emission signal $s(n)$ into a set of coefficients by means of discrete, rotational speed-dependent amplitude values \hat{A}_p . Based on these coefficients, the synthesis step (chapter 2.2) produces audible sound by using additive synthesis.

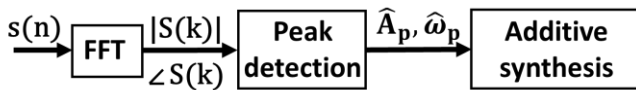


Figure 1: Block diagram of the analysis-and-synthesis procedure based on the sinusoidal model.

2.1. Analysis

The input is a time-discrete (digital) signal $s(n)$ of an electrical drive's run up (Fig.2) – which can be a microphone recording or numerically simulated. The synthesis step (cf. chapter 2.2) either can be based on synchronized information on the rotational speed (e.g. from

CAN bus data) or information on the PMSM geometry by means of its number of pole pairs.

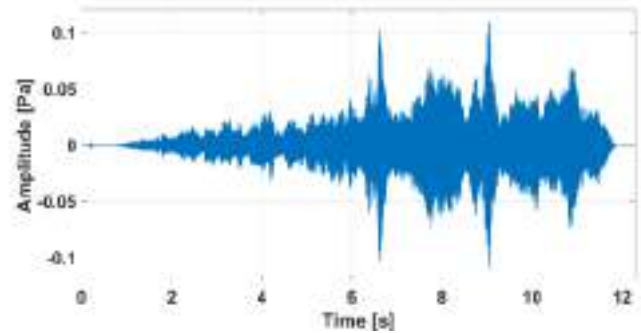


Figure 2: Time signal of the electric engine's run-up.

The Campbell plot (Fig.3) of the run-up signal is showing the main harmonics contributing to the acoustic response of the PMSM at various speeds of rotation (rpm). Using the Fast Fourier Transform (FFT), peak amplitude values \hat{A}_p are computed at discrete frequencies $\hat{\omega}_p$. For the given run-up signal, the plot reveals the signal to be composed by 15 dominant harmonics.

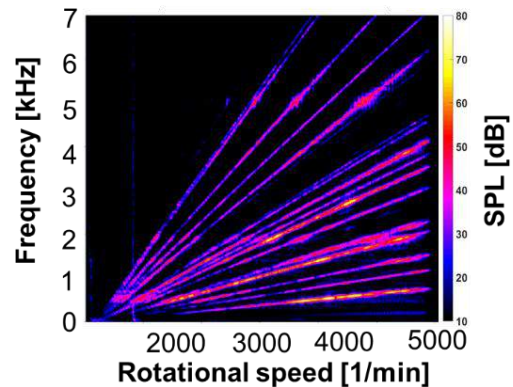


Figure 3: Characteristic spectrogram of the electric engine's sound emission showing multiple sinusoidal harmonics.

Furthermore, it can be observed that each individual oscillator has a unique amplitude envelope. From a perception-related view, this specific pattern is responsible for the characteristic sound of an electric engine. From the time-frequency representation, only the amplitude magnitude $|\hat{A}_{p,N}|$ from each of the N harmonic oscillators is used for the synthesizer programming (Fig.4).

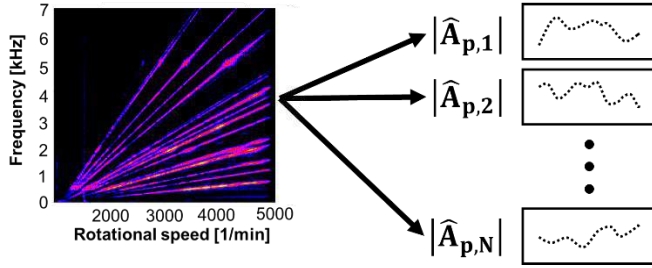


Figure 4: Peak detection and extraction of discrete amplitude envelopes (right, dotted lines) for harmonic oscillators (right) from the time-frequency representation (left).

The amplitude magnitudes (Fig.5) are extracted from the overall spectrogram by using peak detection [9].

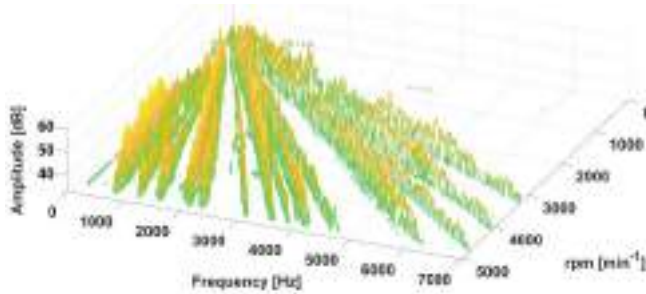


Figure 5: Logarithmically scaled amplitude magnitudes of the run-up signal in dependency of its variables, rotational speed and frequency.

For implementation of the electric engine sound synthesizer, the discretized harmonic oscillator's amplitude values for different rotational speeds are stored by using look-up tables (LUT) in a matrix form (Fig.6).

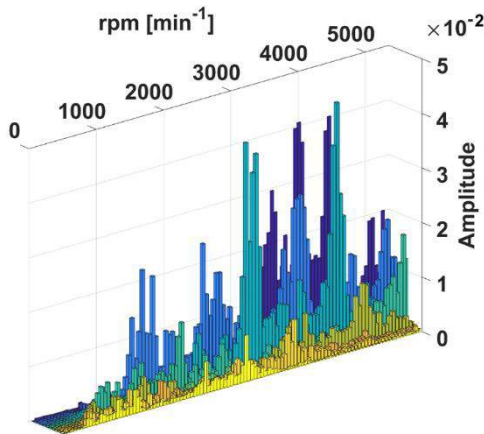


Figure 6: Discretized, linearly scaled amplitude values of the run-up signal. Each data point is stored in the LUT.

2.2. Synthesis

For auralization, the actual source signal of the electric engine must be a 1-channel audio stream format (mono). With regard to the decomposition ending up in multi-channel output information (c.f. chapter 2.1), additive synthesis is used in this work (Fig.7). Each discretized amplitude magnitude $|\hat{A}_{p,N}|$ – that is stored in the LUT – individually scales the amplitude of the according harmonic oscillator ω_N where N denotes an integer multiple of the elementary sinusoidal oscillator's frequency ω_1 .

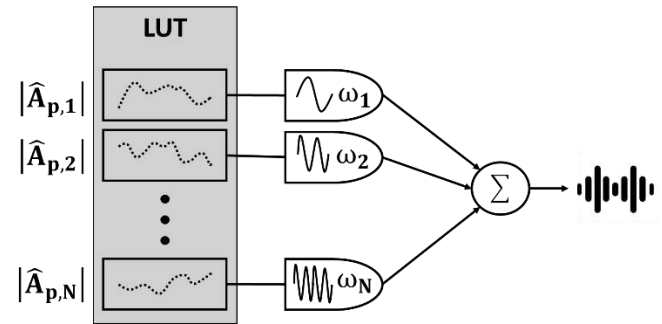


Figure 7: Block diagram of the synthesis step by superposition of N discretized amplitude magnitudes (left) and N sinusoidal oscillators (right).

Auralization of dynamic driving behavior needs continuous control of the electric engine's rotational speed (cf. Table 1). Therefore, the LUT data are interpolated using cubic splines for intermediate rpm values. Moreover, the frequency of each harmonic oscillators linearly scales with the rpm control.

3. RESULTS

The algorithm presented in the previous chapter has been implemented using C++ and added to a VST plugin for synthesis of different road-traffic sound sources [3]. The tool has controls that can be automated in any host Digital Audio Workstation (DAW) or by using the VST plugin host in MATLAB. As shown in Fig. 8, the result of the automated synthesis can be visually monitored in the real-time spectrogram of the graphical user interface (GUI). The resulting 1-channel source signal can be rendered in the DAW and exported as audio file or directly be applied by streaming to auralization software, such as Virtual Acoustics [10].

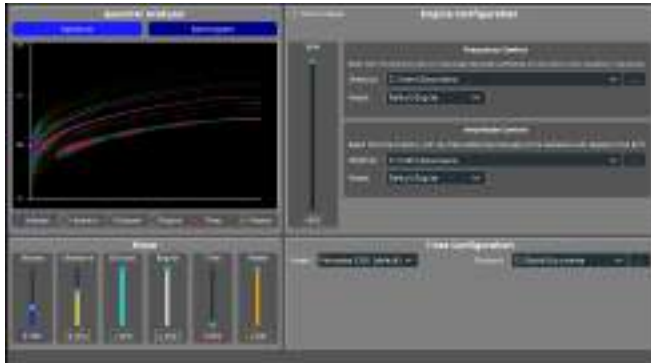


Figure 8: GUI of the electric engine module for synthesizing vehicle sound emissions. The real-time spectrogram window shows the result of a run-up scenario (top, left).

4. CONCLUSIONS

Urban sound simulation and auralization tools can be helpful to better understand the origin of noise effects and the efficiency of mitigation measures. With implementation of synthesizers for various sound sources, here in the example of electric vehicles, prediction towards future environments can be tested, checked by expert panels but also by the population living in the city quarters. The combined method for modeling and synthesizing electric drive sound radiation was proven to create realistic sounds. Further work will focus on integration of the synthesizer in soundscape research by using Virtual Reality to simulate urban environments in a larger context.

5. REFERENCES

- [1] B. Berglund, T. Lindvall, and D. Schwela (Eds.), *Guidelines for community noise*, World Health Organization, Geneva, 1999.
- [2] J. Llorca-Boffí, C. Dreier, J. Heck, and M. Vorländer, “Urban Sound Auralization and Visualization Framework: Case Study at IHTApark”, *Sustainability*, vol. 14, no. 4, 2026, 2022.
- [3] C. Dreier, J. Hahn, J. Heck, J. Llorca-Boffí, and M. Vorländer, “Real-time vehicle pass-by noise synthesis for urban sound auralization”, in *Proc. Int. Cong. Ac.*, (Gyeongju, South Korea), pp. 1–8, 2022.
- [4] C. Dreier, J. Hahn, and M. Vorländer, “Inverse modelling of vehicle pass-by noise for auralizations”, in *Proc. DAGA*, (Stuttgart, Germany), pp. 1455–1458, 2022.
- [5] J. Jagla, J. Maillard, and N. Martin, “Sample-based engine noise synthesis using an enhanced pitch-synchronous overlap-and-add method”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, no. 5, 3098–3108, 2012.
- [6] R. Pieren, T. Bütler, K. Heutschi, “Auralization of Accelerating Passenger Cars Using Spectral Modeling Synthesis”, *Appl. Sci.*, vol. 6, no.5, 2016.

[7] M. van der Giet, J. Blum, P. Dietrich, S. Pelzer, M. Müller-Trapet, M. Pollow, M. Vorländer, and K. Hameyer, “Auralization of electrical machines in variable operating conditions”, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, Canada, pp. 1462–1467, 2011.

[8] Raffaseder, H. (2011). Elektronische Klangerzeugung. In: Audiodesign (2nd ed.), pp. 220–227, Hanser.

[9] Zölzer, U. [Editor] (2011). Spectral processing. In: DAFX: Digital Audio Effects (2nd ed.), pp. 392–445, John Wiley & Sons.

[10] Virtual Acoustics – a real-time auralization framework for scientific research. Institute for Hearing Technology and Acoustics, RWTH Aachen University. URL: <http://www.virtualacoustics.org>

RECONOCIMIENTO DE FUENTES A PARTIR DE MEDIDAS SONOMÉTRICAS PARA EL ANÁLISIS DE PAISAJES SONOROS

Modan Tailleir¹
Pierre Aumond^{2*}
Mathieu Lagrange¹
Vincent Tourre³

¹Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

²Univ Gustave Eiffel, CEREMA, UMRAE, F-44344 Bouguenais, France

³Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, AAU, UMR 1563, F-44000 Nantes, France

RESUMEN

La medida sonométrica estándar (IEC 61672-1) proporciona espectrogramas en bandas de tercio de octava con una ventana cada 1 s (lento) y 125 ms (rápido). Esta medida se utiliza a menudo en aplicaciones de monitoreo a largo plazo en la acústica urbana, ya que requiere poca capacidad de almacenamiento y preserva la privacidad. Sin embargo, la composición de la escena sonora se pierde y el análisis del entorno sonoro se dificulta. En los últimos años, los algoritmos de clasificación pre-entrenados como YAMnet o PANN han permitido una calidad de clasificación suficiente para tales análisis. Sin embargo, la mayoría de estos algoritmos requieren representaciones espectrales de Mel con una ventana temporal muy rápida (e.g. 10 ms). En este trabajo, proponemos una arquitectura de red neuronal convolucional para la transcodificación de espectrogramas de tercio de octava lentos o rápidos, de modo que puedan ser utilizados como entrada para modelos robustos pre-entrenados. En comparación con la creación de un nuevo modelo que tomaría como entrada espectrogramas de tercio de octava rápidos, esta aproximación es más eficiente y requiere menos entrenamiento. Los experimentos muestran que el modelo propuesto tiene una precisión de clasificación relevante para el análisis del paisaje sonoro.

ABSTRACT

The standard sound level meter measurement (IEC 61672-1) provides spectrograms in 1/3 octave bands with a window every 1 s (slow) and 125 ms (fast). This measurement is often used in long-term monitoring applications in urban acoustics, as it requires little storage capacity and preserves privacy.

However, the composition of the sound scene is lost and the analysis of the sound environment is made difficult. In recent years, pre-trained classification algorithms such as YAMnet or PANN have allowed a sufficient classification quality for such analyses. However, most of these algorithms require Mel spectral representations with a very fast temporal window (e.g. 10 ms). In this work, we propose a convolutional neural network architecture for transcoding slow or fast 1/3 octave spectrograms, so that they can be used as input for pre-trained robust models. Compared to the creation of a new model that would take fast 1/3 octave spectrograms as input, this approach is more efficient and requires less training. The experiments show that the proposed model has a relevant classification accuracy for soundscape analysis.

Palabras Clave— Paisaje sonoro, clasificación, fuentes sonoras.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, varios modelos de clasificación de fuentes de sonido han obtenido reconocimiento por su robustez y precisión. Entre ellos, los modelos pre-entrenados YAMNet y PANNs han surgido como modelos potentes capaces de predecir la presencia de más de 500 fuentes de sonido, gracias a su entrenamiento en la extensa base de datos Audioset [1]. Estos modelos utilizan representaciones espectrales muy finas (e.g. 63 bandas Mel, 10 ms) en datos de entrada (muchas veces pre-procesada internamente desde una señal audio).

* **Autor de contacto:** pierre.aumond@univ-eiffel.fr

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

La medida sonométrica estándar (IEC 61672-1) proporciona espectrogramas en bandas de tercio de octava con una ventana cada 1 s (lento) y 125 ms (rápido). Los espectrogramas de tercio de octava rápidos ofrecen varias ventajas sobre los espectrogramas Mel/10ms o el audio para aplicaciones de monitoreo a largo plazo. En primer lugar, hacen que las grabaciones sean incomprensibles [2]. Además, son más livianos, con una velocidad de bits aproximadamente 138 veces menor que la de las grabaciones de formas de onda mono de 16 bits, 32 kHz, y alrededor de 30 veces menor que la de las grabaciones Mel, 10ms. Finalmente, es importante destacar que numerosos ingenieros acústicos, investigadores y observatorios de ruido han acumulado en sus bases de datos extensas colecciones de estos espectrogramas capturados en los últimos años. Estos recursos representan horas y días de datos que presentan una valiosa oportunidad para un análisis exhaustivo.

Gontier et al. abordaron tareas de clasificación de múltiples etiquetas en entornos urbanos utilizando una Red Neuronal Convolutiva (CNN) entrenada directamente en espectrogramas de tercio de octava [3]. Si bien su modelo mostró un buen rendimiento en el conjunto de datos Cense Lorient [5], carece de robustez en otros conjuntos de datos grabados en tercios de octava. Esta limitación surge en parte del entrenamiento del modelo en conjuntos de datos altamente homogéneos.

Para usar modelos pre-entrenados, se puede entonces imaginar una tarea de super resolución, generando señales completas a partir de tercio de octava, 125ms. Hasta donde sabemos, no hay otros trabajos disponibles específicamente para la tarea en cuestión en el procesamiento de audio. En el campo de la visión por computadora, se han propuesto varios métodos para abordar la tarea de convertir un conjunto de características en otro conjunto de características (feature translación) [4]. Se puede emplear una pseudoinversa para recuperar un espectrograma Mel, 10 ms a partir de un espectrograma de tercio de octava, 125ms y la información temporal puede ser interpolada. Esto resultaría en un espectrograma Mel difuminado, que podría considerarse análogo a una imagen ruidosa en un paradigma de eliminación de ruido. Se han utilizado métodos de codificación automática, métodos adversarios y métodos de difusión en tareas de súper resolución y eliminación de ruido. La idea es, entonces, de aplicar tareas de súper resolución en el campo de la espectrogrametría y verificar el potencial de tal metodología.

2. METODO

2.1. Transcodificador o *Transcoder*

En este estudio, empleamos el método de cálculo de tercio de octava con una ventana de 125 ms, como se describe en el

proyecto Lorient, para generar el espectrograma utilizado. Este enfoque implica la subdivisión del rango de frecuencia de 20 Hz a 12,5 kHz en 29 bandas de tercio de octava y utiliza una ventana temporal rectangular de 125 ms.

Es relevante destacar que, aunque tanto el modelo YAMNet como los clasificadores PANNs requieren espectrogramas Mel de 10 ms como entrada, los espectrogramas utilizados por estos modelos presentan diferencias sutiles entre sí. Por lo tanto, es necesario realizar ajustes en el transcodificador propuesto para PANNs en este contexto a fin de adaptarlo para su uso con YAMNet.

La arquitectura del modelo de transcodificación propuesto consta de dos componentes principales: un transcodificador basado en la pseudoinversa (PINV) y una Red Neuronal Convolutiva (CNN). El primer componente, el transcodificador PINV, realiza la reconstrucción del espectrograma de banda fina (63 Mel bins, 10 ms) a partir del espectrograma de tercio de octava de manera eficiente mediante un proceso de pseudoinversa. El segundo componente, la red neuronal convolutiva (CNN), asume la tarea de refinar el espectrograma Mel, 10 ms mediante la incorporación de información residual.

Para el entrenamiento de nuestro modelo de CNN, seguimos un enfoque similar al de profesor-alumno. En este enfoque, aprovechamos las salidas generadas por clasificadores pre-entrenados, como YAMNet o PANNs, para guiar la generación del espectrograma Mel. Es decir, utilizamos la información proporcionada por estos clasificadores como una guía para mejorar la calidad y la precisión del espectrograma generado por nuestra red neuronal convolutiva.

El conjunto de datos utilizado para entrenar y evaluar el transcodificador es el TAU Urban Acoustic Scenes 2020 Mobile dataset [5]. Este conjunto contiene clips de audio de 10 segundos de duración de 10 escenarios acústicos diferentes, como aeropuertos, centros comerciales, estaciones de metro y más. Utilizamos solo el subconjunto de desarrollo y datos del dispositivo A, con 29 horas y 20 minutos de audio. Dividimos aleatoriamente este subconjunto en conjuntos de entrenamiento (70%), validación (15%) y evaluación (15%). Los archivos de audio se normalizaron usando el valor absoluto máximo. Es relevante destacar que el enfoque profesor-alumno permite aprovechar conjuntos de datos no anotados, ya que PANN (el modelo guía) proporciona las anotaciones.

La metodología completa y la arquitectura detallada de las redes se encuentran disponibles en Tailleux et al. 2023 [6].

2.2. Dataset

En el marco del proyecto ADEME GRAFIC, se llevaron a cabo cuatro rondas de evaluaciones perceptivas en un recorrido de 2.1 km en el 13er distrito de París. Los detalles completos del conjunto de datos se pueden encontrar en Aumond et al. [7], pero aquí presentamos los aspectos esenciales.

Se realizaron evaluaciones perceptivas simultáneas durante pausas de alrededor de 3 a 5 minutos en 19 puntos a lo largo del recorrido. Se recopilaban grabaciones de audio y mediciones físicas utilizando un sonómetro móvil durante las caminatas de reconocimiento en el terreno y en los días de evaluación, manteniendo cierta distancia del grupo para evitar influencias en las mediciones. El tiempo total del recorrido fue de aproximadamente 45 minutos, con un promedio de 115 metros entre cada punto. El recorrido abarcaba desde lugares muy silenciosos hasta muy ruidosos en la escala de la ciudad de París.

Los recorridos se realizaron en dos días diferentes: el 23 de marzo de 2015 entre las 11:00 y las 12:00, y entre las 15:00 y las 16:00, así como el 30 de marzo de 2015 en los mismos horarios. Participaron 8, 8, 11 y 9 sujetos respectivamente, sumando un total de 37 participantes. En cada punto de evaluación, el grupo se detenía para completar un cuestionario y calificar 16 variables en una escala del 1 al 11. En este contexto, nos centramos en tres variables: el tiempo percibido de presencia de voces, canto de aves y tráfico vehicular. Estas tres fuentes están correlacionadas con los entornos sonoros sociales, mecánicos y naturales, componentes esenciales de los entornos urbanos que influyen en la percepción [8].

Aunque se evaluaron 19 lugares diferentes, se obtuvieron evaluaciones de alrededor de diez personas para un total de 74 entornos sonoros. En resumen, el conjunto de datos utilizado en este estudio corresponde a los 74 entornos sonoros con calificaciones promedio de aproximadamente 10 participantes en las tres categorías: tiempo percibido de presencia de voces, canto de aves y tráfico vehicular.

2.2. Métrica de rendimiento

Las métricas globales de rendimiento de nuestro transcodificador se encuentran detalladas en el artículo de referencia [6]. En este trabajo, aplicamos el transcodificador en el contexto de un paisaje sonoro. El algoritmo PANN puede ser empleado directamente en los 74 audios recolectados. Para cada segmento de audio de 10 segundos, el algoritmo genera un índice en el rango de 0 a 1 para cada una de las 527 clases, indicando la presencia o ausencia de la clase en los 10 segundos previos. Dado que nuestros clips de audio tienen una duración aproximada de un minuto,

obtenemos alrededor de 6 valores por cada clase y por cada segmento de audio.

Basándonos en esto, evaluamos la correlación entre la evaluación perceptiva promedio proporcionada por los peatones y el promedio de estos índices para tres clases específicas: "Vehicle", "Speech" y "Chirp, Tweet". Luego, comparamos estos resultados con el rendimiento de los modelos PANNs, pero aplicados no directamente al audio, sino a las señales sonométricas en tercios de octava, 125 ms, gracias a la transcodificación.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 presenta la correlación de Pearson entre el tiempo de presencia percibido promedio para las fuentes sonoras de Voz, Cantos de Aves y Tráfico Vehicular, y el promedio de las evaluaciones proporcionadas por PANN y el método propuesto, para las categorías de "Vehicle", "Speech" y "Chirp, Tweet".

Tabla 1. Correlación de Pearson entre el tiempo de presencia percibido promedio para las fuentes sonoras de Voz, Cantos de Aves y Tráfico Vehicular, y el promedio de las evaluaciones proporcionadas por PANN y el método propuesto, para las categorías de "Vehicle", "Speech" y "Chirp, Tweet".

	PANN	Transcodificador + PANN
Voz	0,51	0,47
Cantos de aves	0,72	0,70
Trafico rodado	0,72	0,77

Se puede observar que los resultados de correlación obtenidos entre PANN por sí solo y a través del transcodificador son muy similares. En otras palabras, a partir de una señal de baja resolución, gracias al transcodificador entrenado previamente, las actuaciones solo se degradan ligeramente. Es importante destacar que la parte de varianza no explicada por el indicador puede deberse tanto a un error de clasificación como a la incertidumbre inherente a las mediciones perceptivas, ya que nuestra línea base se fundamenta en evaluaciones de percepción que están sujetas a todos los sesgos propios de este tipo de medidas.

4. DISCUSION Y CONCLUSION

En este estudio, proponemos un enfoque de profesor-alumno para aprender un transcodificador que convierte representaciones espectrales de tercio de octava con una ventana de 125 ms en espectrogramas Mel de 10 ms. Estos espectrogramas se utilizan como entrada para clasificadores pre-entrenados como PANN y YAMNet. Nuestra técnica

muestra correlaciones muy similares a las obtenidas directamente con PANN en términos de tiempo de presencia percibido para cantos de aves, voz y tráfico vehicular, a pesar de las limitaciones de resolución temporal y frecuencial de los espectrogramas de tercio de octava. Además, la precisión obtenida ($r > 0,5$, $p < 0,001$) podría ser de gran relevancia para el análisis del entorno sonoro.

En términos generales, los resultados de precisión del modelo para clasificar muestras sonoras o sonométricas se pueden encontrar en Tailleux et al. [6].

No obstante, una limitación de nuestro enfoque es que se requiere entrenar un nuevo transcodificador para cada representación espectral-temporal, con el fin de adaptarse a diferentes parámetros como el número de bins Mel, la cantidad de frecuencias, el tamaño del salto, la frecuencia de muestreo, entre otros. Para abordar esta limitación, futuras investigaciones podrían explorar la reconstrucción completa del audio a partir de una representación espectral de tercio de octava rápida o lenta, lo que permitiría utilizar clasificadores pre-entrenados como el avanzado modelo PANN Wavegram-Logmel-CNN (que toma audio como entrada). Algunas pruebas preliminares también se presentan en el “companion page” siguiente:

github.com/modantailleux/paperSpectralTranscoder

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por el proyecto ANR-20-THIA-0011 "AiBy4".

6. REFERENCIAS

- [1] J. F. Gemmeke *et al.*, « Audio Set: An ontology and human-labeled dataset for audio events », in *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, mars 2017, p. 776-780. doi: 10.1109/ICASSP.2017.7952261.
- [2] F. Gontier, M. Lagrange, P. Aumond, A. Can, et C. Lavandier, « An Efficient Audio Coding Scheme for Quantitative and Qualitative Large Scale Acoustic Monitoring Using the Sensor Grid Approach », *Sensors*, vol. 17, n° 12, p. 2758, nov. 2017, doi: 10.3390/s17122758.
- [3] F. Gontier, C. Lavandier, P. Aumond, M. Lagrange, et J.-F. Petiot, « Estimation of the perceived time of presence of sources in urban acoustic environments using deep learning techniques », *Acta Acust. United Acust.*, vol. 105, n° 6, p. 1053-1066, 2019.
- [4] W. Kuang, Y.-L. Chan, S.-H. Tsang, et W.-C. Siu, « Fast HEVC to SCC Transcoder by Early CU Partitioning Termination and Decision Tree-Based Flexible Mode Decision for Intra-Frame Coding », *IEEE Access*, vol. 7, p. 8773-8788, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890720.
- [5] A. Mesaros, T. Heittola, et T. Virtanen, « A multi-device dataset for urban acoustic scene classification », arXiv, 11 octobre 2018. doi: 10.48550/arXiv.1807.09840.
- [6] M. Tailleux, M. Lagrange, P. Aumond, et V. Tourre, « Spectral transcoder: using pretrained urban sound classifiers on undersampled spectral representations », in *8th Workshop on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE)*, 2023.
- [7] P. Aumond, A. Can, B. De Coensel, C. Ribeiro, D. Botteldooren, et C. Lavandier, « Global and continuous pleasantness estimation of the soundscape perceived during walking trips through urban environments », *Appl. Sci.*, vol. 7, n° 2, p. 144, 2017.
- [8] F. Aletta, J. Kang, et Ö. Axelsson, « Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models », *Landsc. Urban Plan.*, vol. 149, p. 65-74, mai 2016, doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.02.001.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AAM-4 Ruido y vibraciones en el ambiente laboral.



APLICACIONES DE LOS SENSORES INERCIALES DE RELOJES INTELIGENTES EN PRL Y SALUD

Ignacio Pavón García^{1*}, Carlos Polvorinos-Fernández¹, César Asensio Rivera¹, Juan Manuel López Navarro¹, Luis Francisco Sigcha², Guillermo De Arcas Castro¹

¹ Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

² Data-Driven Computer Engineering (D2iCE) Group, Department of Electronic and Computer Engineering, University of Limerick, Limerick, V94 T9PX, Ireland

RESUMEN

Los actuales relojes inteligentes incluyen sensores inerciales de tipo MEMS (*microelectromechanical systems*) que permiten medir aceleración y velocidad angular que pueden ser utilizadas para distintas aplicaciones de captura y análisis de movimiento con aplicación en los ámbitos de la salud y la prevención de riesgos laborales (PRL), entre otros.

En esta comunicación se presentan varias experiencias de uso de este tipo de tecnología, como pueden ser la determinación del tipo de máquina utilizada y la tarea ejecutada por un trabajador, o la evaluación y seguimiento de trastornos del movimiento relacionado con enfermedades de tipo neurodegenerativo.

ABSTRACT

Current smartwatches include inertial sensors of the MEMS (*microelectromechanical systems*) type that measure acceleration and angular velocity which can be used for different applications of motion capture and analysis with applications in the fields of health and occupational risk prevention (ORP), among others.

In this communication, several experiences of use of this type of technology are described, such as the determination of the type of machine used and the task performed by a worker, or the evaluation and monitoring of movement disorders related to neurodegenerative diseases.

Palabras Clave— Relojes inteligentes, inteligencia artificial, prevención de riesgos laborales, salud

1. INTRODUCCIÓN

Los *wearables* son dispositivos electrónicos diseñados para ser llevados en el cuerpo, ya sea como accesorios o en la ropa. Estos dispositivos han revolucionado la forma en que interactuamos con la tecnología, ya que se integran perfectamente en nuestra vida cotidiana gracias a los avances en electrónica de consumo, miniaturización y telecomunicaciones de los últimos años.

Este tipo de dispositivos suelen tener incorporados sensores inerciales de tipo MEMS (*microelectromechanical systems*) como los acelerómetros y los giroscopios. [1]

Los acelerómetros permiten registrar la aceleración de un objeto en una o más direcciones. Su funcionamiento se basa en la detección de la aceleración relativa experimentada por la masa suspendida con respecto a la estructura de soporte y, la convierte en una señal eléctrica proporcional, que representa la magnitud y dirección de la aceleración aplicada. Los giroscopios miden la velocidad angular de un objeto, a partir de la orientación o rotación de un objeto en el espacio, basándose en el principio de conservación del momento angular, que establece que un objeto en rotación tiende a mantener su eje de rotación invariable a menos que se aplique un momento externo para cambiar su dirección de rotación.

Con estos sensores, se pueden medir una amplia variedad de datos biométricos y parámetros relacionados con el movimiento, la frecuencia cardíaca o el sueño, entre otros. Por lo que estos datos pueden ser utilizados en multitud de aplicaciones, como puede ser la evaluación de la actividad física o la monitorización de la salud de las personas [2].

En la actualidad, esta tecnología está cada vez más presente en la sociedad [3]. Uno de los *wearables* más utilizados son los relojes inteligentes, ya que combinan las funcionalidades de un dispositivo inteligente en un formato reducido, portable y fácil de utilizar. Una de las grandes ventajas de estos dispositivos, y que potencia la utilidad y precisión de los datos recogidos por los sensores, es su colocación en el cuerpo humano, al situarse en la zona del antebrazo y estar en contacto directo con la piel de los usuarios. Esto facilita la utilización de sensores especializados para medir pulso, temperatura, sudoración, presión y otras muchas variables, que permiten que la información medida sea más variada, amplia, de mejor precisión y de mayor utilidad.

Todo esto, combinado con las características técnicas propias de los relojes inteligentes (velocidad de procesamiento, almacenamiento de datos, conexión inalámbrica o facilidad de uso diario), hacen que estos dispositivos tengan el potencial para el desarrollo de una amplia variedad de funcionalidades como, por ejemplo, la detección de caídas, navegación en entornos de realidad aumentada, o mejorar la seguridad y la toma de decisiones en situaciones de riesgo.

Unos de los campos donde la utilización de relojes inteligentes ha supuesto un gran cambio es en el ámbito del reconocimiento de actividades humanas, sobre todo para la prevención de riesgos laborales (PRL), y la monitorización de la salud de las personas.

En este trabajo se presentan varias experiencias de uso de este tipo de tecnología en estos dos ámbitos.

2. MÉTODOS

Para cualquier tipo de uso, el proceso comienza con la adquisición de datos del reloj inteligente que lleva el usuario, ya sea a través de aplicaciones desarrolladas o comerciales preinstaladas en el dispositivo.

En los casos expuestos en este documento, se empleó una aplicación Android desarrollada por el proyecto TECAPARK [4], la cual permite el registro de los datos de los acelerómetros y giroscopios de un reloj inteligente comercial. Tras el registro inicial de los datos, se realiza un preprocesamiento necesario para que los algoritmos y modelos de inteligencia artificial tengan rendimiento adecuado. Posteriormente, se realiza el etiquetado de los datos, de forma manual o automática, según la aplicación.

Seguidamente, se procede a la extracción de características que serán utilizados para el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial.

Según la aplicación, se requerirán unas características u otras. Existen un amplio abanico de posibilidades en la bibliografía. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales características para caso de uso.

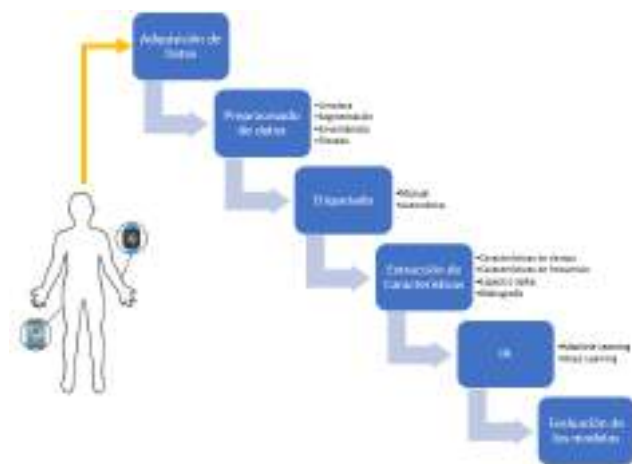


Figura 1. Flujo de trabajo seguido en los casos de uso

A partir de esta etapa, se puede realizar el desarrollo y entrenamiento de modelos de inteligencia artificial, pudiendo ser algoritmos de aprendizaje automático, aprendizaje profundo, redes neuronales, etc.

En la Figura 1 se muestra el proceso expuesto.

Tabla 1: Características usadas en los casos de uso

Características	Número	Descripción
Estadísticos dominio del tiempo	6	Desviación media, media, mediana, percentiles (25-75), oblicuidad
Estadísticos dominio de la frecuencia	6	
Líneas espectrales de la FFT	128	128 líneas espectrales
HAR [5]	290	Reconocimiento automático de actividades humanas
Señal Cruda	(Muestras *3)	Señal triaxial bruta enventanada obtenida de los sensores
Específicas para el caso de salud		
MFCCs [6]	36 (12*3)	Coefficientes cepstrales en frecuencias de mel
Mahadevan et al. [7]	64 (8*8)	RMS, rango de la señal, entropía de la señal, frecuencia y magnitud dominantes, relación entre la banda de frecuencia dominante y la energía total, horizontalidad espectral, entropía espectral.
Hssayeni et al. [8]	39	Potencia en dos bandas específicas (4-6Hz y 0,5-15Hz), características de auto correlación, entropía espectral, primeras y segundas frecuencias dominantes y magnitudes, correlaciones cruzadas entre pares del eje.

A continuación, se exponen dos casos de uso. En primer lugar, se expondrá la aplicabilidad al ámbito de la PRL para la identificación de maquinaria utilizada y para la clasificación de tareas llevadas a cabo, y, posteriormente, se tratará el uso en el campo de la salud.

2.1. PRL

La evaluación de riesgos laborales no es ajena a la innovación tecnológica de los relojes inteligentes. Existen varias propuestas para la evaluación de riesgos en el puesto de trabajo gracias a los dispositivos de tipo *wearable* [9] [10]. Toda la información recolectada por los sensores de estos dispositivos proporciona información que puede ser usada para la gestión de riesgos al permitir a los responsables de salud y seguridad: identificar riesgos específicos;

perfeccionar las medidas para reducir las lesiones; crear una cultura de seguridad y educación en los trabajadores en el puesto de trabajo; y garantizar la productividad y la relación coste-beneficio para la empresa [11].

Uno de los riesgos típicos en determinados sectores es la exposición a las vibraciones, donde los trabajadores que utilizan herramientas en su día a día están expuestos a vibraciones transmitidas al sistema mano-brazo, como puede ser al utilizar herramientas manuales vibratorias, maquinaria móvil y fija o al conducir vehículos pesados. La exposición a la vibración transmitida al sistema mano-brazo es una de las principales causas de enfermedades profesionales como trastornos neurológicos o musculoesqueléticos, enfermedades vasculares y trastornos musculares que se manifiestan como dolor, entumecimiento, rigidez y disminución de la fuerza muscular [12]. Los procedimientos técnicos para la medición de la magnitud y la exposición a las vibraciones mano-brazo se definen en la norma ISO 5349 (las partes 1 y 2). Las evaluaciones del riesgo de exposición a las vibraciones suelen realizarse a partir de mediciones durante cortos periodos de tiempo, intentando obtener valores representativos de la exposición del trabajador durante una operación o un ciclo de trabajo.

En diferentes estudios se ha detectado que las mediciones realizadas siguiendo los procedimientos definidos muestran una gran variabilidad con los valores declarados por los fabricantes de máquinas y herramientas [13].

Por lo tanto, la evaluación de riesgos será más precisa cuando se realice con mediciones reales y se tenga en cuenta los factores que influyen en la incertidumbre de la medición, como las características del acelerómetro, los métodos de fijación y el tiempo de exposición [14].

Con el fin de resolver los problemas encontrados y mejorar los procedimientos de evaluación del riesgo de vibración es posible utilizar tecnología *wearable*. [15]

2.1.1 Identificación de Tareas

Uno de los casos de uso es la identificación de las tareas realizadas por operarios gracias a los datos recolectados por un reloj inteligente. En este caso, se registró la actividad de 2 técnicos de laboratorio durante 7 horas a lo largo de 10 días. En la Figura 2, se ilustran dos de las máquinas empleadas por dichos operarios.



Figura 2. Maquinaria empleada por los operarios de taller.

Durante ese tiempo, cada uno de los técnicos utilizó un reloj inteligente, registrando 3 señales del acelerómetro.

En la Figura 1 se describe el procedimiento seguido. Para este caso de uso, el preprocesado consiste en un filtrado de la señal mediante un filtro de Butterworth, seguido de un eventanado con ventanas de 256 muestras sin solapamiento. De dicha señal se obtuvieron, por un lado, características en el dominio del tiempo, y, por otro, después de aplicar una ventana de Hanning y transformada rápida de Fourier (FFT), características en el dominio de la frecuencia.

Además, a partir de las 3 señales de aceleración, se ha obtenido el valor RMS a partir de los 3 valores de aceleración obtenidos de cada reloj, de acuerdo con la ecuación 1:

$$\Sigma a_{xyz} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

La base de datos estaba compuesta por 420 características (140 por eje) junto a las 290 características obtenidas de la combinación de las 3 señales, según [5], utilizadas para el reconocimiento automático de actividades humanas.

A partir de dicha base de datos, se ha realizado un análisis de componentes principales (PCA) y se desarrollaron los modelos de clasificación de actividad, dividiéndolo en tres niveles. El nivel 0 diferencia entre el tiempo operativo y no operativo. El nivel 1 clasifica las tareas operativas entre mecanizado, programación y trabajo manual. Para la categoría “Trabajo Manual”, se diferencia entre el uso de sierra, taladrado y destornillador eléctrico. La jerarquía de clasificación se muestra en la Figura 3.

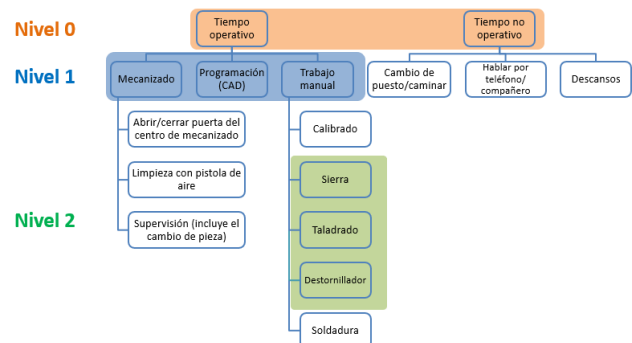


Figura 3. Niveles en la identificación de tareas.

En este caso, se han aplicado los siguientes modelos: *logistic regression*, *linear discriminant analysis*, *gradient boosting*, *Ada Boost*, *k-nearest neighbors*, *decision trees*, *SVC*, *linear SVC*, *MLPC*, *Random Forest*, *Gaussian NB*.

Tras el entrenamiento de estos modelos, se obtuvo que, para el nivel 0, el mejor clasificador se obtiene utilizando *Random Forest*, con 150 características, cuyas métricas son AUC de 0,859; F1-score de 0,776; y precisión de 0,777. En cuanto al nivel 1, la mejor precisión la tiene nuevamente el clasificador tipo *Random Forest*, con las métricas de la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados del clasificador de Nivel 1 de tareas

Categoría	Precisión	Recall	F1-score	Exactitud
Mecanizado	0,67	0,63	0,65	0,6817
CAD	0,83	0,68	0,75	
Trabajo Man.	0,62	0,75	0,68	

A partir de este clasificador de tareas, se pueden desarrollar numerosos clasificadores de las tareas del nivel 1, como el que se plantea el siguiente apartado.

2.1.2 Identificación de Herramientas

Se desarrollaron clasificadores que permiten diferenciar entre 3 tipos de herramientas: taladros, sierras de calar y destornilladores eléctricos. Este clasificador se integraría dentro de la categoría de trabajo manual del nivel 1 del clasificador propuesto en el apartado anterior.

Además, se utilizaron 3 modelos diferentes de cada una de las categorías a predecir, con el fin de tener una amplia y variada base de datos. Por lo que, se desarrolló un segundo modelo que discriminaba entre el modelo utilizado.



Figura 4. Modelos usados en el desarrollo del clasificador

Cada herramienta se utilizó sobre la superficie adecuada para su uso: la taladradora se empleó sobre una pieza de mármol, y la sierra de calar y el destornillador se usaron sobre madera. La toma de datos se realizó llevando a cabo 3 registros de 90 segundos empleando las 9 herramientas.

Además, para aumentar la diversidad de la base de datos, se recopilamos datos de los sensores con 2 relojes diferentes.

Por lo tanto, la base de datos generada en este trabajo está compuesta por la señal de los 3 sensores de 2 relojes inteligentes diferentes utilizando 3 tipos de herramientas distintas y para cada tipo, 3 modelos diferentes (9 unidades).

A partir de dicha base de datos, se generó una segunda base de datos utilizando el valor RMS según la ecuación 1.

Con esto, se pudo trabajar con 2 bases de datos diferentes obtenidas a partir de la misma medida. Partiendo de estas, se ha seguido el procedimiento explicado en la Figura 1.

Particularizando el proceso, la extracción de características de la señal se llevó a cabo mediante un enventanado, con un tamaño de la ventana de 256 muestras y un solapamiento del 50%. Después, se usó una ventana Hanning antes de aplicar a la señal la transformada rápida de Fourier (FFT) con el objetivo obtener datos en el dominio de la frecuencia. Tras esto, se expresaron los resultados utilizando el nivel de aceleración (L_a) definido en la ecuación 2.

$$L_a = 20 \log \left(\frac{a}{10^{-6}} \right) \quad (2)$$

Además, para cada ventana, se obtuvieron características estadísticas en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Después, tras un análisis PCA, se desarrollaron los algoritmos de clasificación de tipo *Decision tree*, *Naive Bayes*, *K-nearest neighbor*, *Parzen classifier*, y los modelos no lineales *Fisher's Least Square Linear Discriminant*, *Logistic Linear*, *Nearest Mean*, *Polynomial classifier*.

En primer lugar, se ha desarrollado el clasificador del tipo de herramienta utilizada (taladro, sierra de calar o destornillador eléctrico). Se han planteado dos clasificadores diferentes en función de la base de datos: uno a partir de la señal de cada uno de los 3 ejes del acelerómetro, y otro a partir de la obtenida a partir del valor RMS de aceleración en los 3 ejes.

En segundo lugar, se ha plantado el clasificador de modelos de herramienta entre los 3 utilizados. En este caso, de igual manera que en el anterior clasificador, se han planteado dos clasificadores a partir de cada base de datos.

Una vez entrenados y validados, se pudo evaluar qué modelos y/o bases de datos ofrecían un mejor rendimiento en la clasificación de las herramientas.

Tabla 3. Resultados del clasificador de herramientas

Categoría	Extracción	Modelo	Precisión
Tipo de Herramienta	Señal Cruda	<i>Polynomial classifier</i>	95,5%
Modelo de Herramienta			
Taladros	Señal Cruda	<i>Parzen classifier</i>	91,0%
Sierra de Calar	Señal Cruda	<i>Parzen classifier</i>	90,4%
Destornillador	Señal Cruda	<i>Parzen classifier</i>	97,8%

2.2. Salud

En el ámbito de la salud, el uso de relojes inteligentes ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años. Son numerosos los autores que han realizado estudios médicos gracias al uso de este tipo de dispositivos: en [16] han desarrollado una aplicación que permite detectar paro cardíaco extrahospitalario; en [17] han estudiado la posibilidad de sustituir el diario de sueño por un reloj inteligente en las personas con trastornos del sueño; en [18] ha propuesto un sistema que predice caídas.

Se presenta el planteamiento para la evaluación y seguimiento de trastornos del movimiento relacionados con enfermedades de tipo neurodegenerativo. Concretamente, se ha trabajado en la evaluación de la constancia y amplitud del temblor de pacientes de Parkinson.

Para ello, se tomaron datos de 18 pacientes a lo largo de 2 a 8 semanas [4]. Mediante una serie de ejercicios pautados, se registraron los valores del acelerómetro del reloj inteligente de los pacientes.

Según la guía UPDRS sección 3.17, la amplitud del temblor se evalúa entre 0 (sin presencia de temblor) a 2 (temblor leve). Según la sección 3.18 de la misma guía, la constancia se califica como 0 (sin presencia temblor) a 4 (existe temblor en más del 75% del examen).

Como se observa en la Figura 5, se desarrollaron 3 modelos: un clasificador para saber si el paciente estaba en reposo, un detector de temblor, y, a partir de ambos, un evaluador de la amplitud y constancia del temblor.



Figura 5. Enfoque para la evaluación del temblor en reposo

Para el clasificador de contexto, se plantearon algoritmos diferentes, cada uno con una extracción de características particular, expuestas en la Tabla 1. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos. Se puede observar que el mejor clasificador de contexto se obtiene de la combinación de un modelo CNN multitarea entrenado con la señal medida.

Tabla 4. Resultados del clasificador de contexto

Características	Modelo	Sensibilidad	Especificidad	AUC
HAR [5]	AdaBoost	88.5%	88.6%	0.953
Señal cruda	CNN multitarea	92.9%	93.0%	0.981
FFT	CNN multitarea	89.0%	89.1%	0.960

Para el detector de temblor, de igual manera, se han propuesto varios algoritmos de inteligencia artificial y diferentes tipos de características, expuestas en la Tabla 1. El mejor clasificador se obtiene usando un modelo CNN con características de la FFT de la señal como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del detector de temblores

Características	Modelo	Sensibilidad	Especificidad	AUC
MFCCs [6]	AdaBoost	82.6%	82.2%	0.905
Mahadevan et al. [7]	Random Forest	82.3%	84.0%	0.893
Hssayeni et al. [8]	Gradient Boost	84.1%	84.0%	0.922
FFT	CNN multitarea	86.1%	86.1%	0.936

Por último, se evaluó de la amplitud y constancia del temblor en reposo en aquellas ventanas temporales en las que se detecta que el paciente está en reposo y se identifica la presencia de temblores.

Por un lado, se planteó un análisis espectral de las señales inerciales para realizar la evaluación de la amplitud del temblor, ya que, de acuerdo con la literatura, este presenta un aumento en el rango de frecuencia 3,5 a 7,5 Hz cuando el paciente presenta temblores en reposo.

Para proporcionar un indicador de amplitud se calculó el nivel de aceleración (L_a) de la amplitud RMS en la banda de temblor para cada ventana de análisis, según la ecuación 2. Siguiendo la metodología propuesta en [7], se ha comprobado que, utilizando el nivel L_a como indicador de magnitud del temblor en reposo, el percentil 75 logra una gran correspondencia con la evaluación clínica que se realiza según la guía UPDRS sección 3.17.

En la Figura 6, se muestra la concordancia entre el nivel de aceleración obtenido a partir de los modelos CNN multitarea (con FFT y con señal cruda) y la evaluación clínica UPDRS.

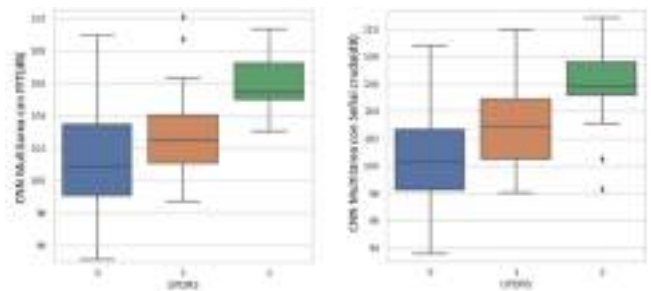


Figura 6. Concordancia entre los resultados del modelo CNN multitarea y la evaluación clínica

Por otro lado, para la evaluación de la constancia del temblor, se analizaron los datos de una visita semanal. Se compararon los segmentos en los que se detectaba que paciente estaba temblando con los segmentos en los que el paciente realmente lo hacía. En este caso, la comparación de los resultados de la constancia del temblor en reposo entre ambos segmentos se hizo en forma de porcentaje.

Como se muestra en la Figura 7, se encontró una fuerte correlación entre la constancia obtenida mediante la evaluación de vídeo y los enfoques CNN multitarea.

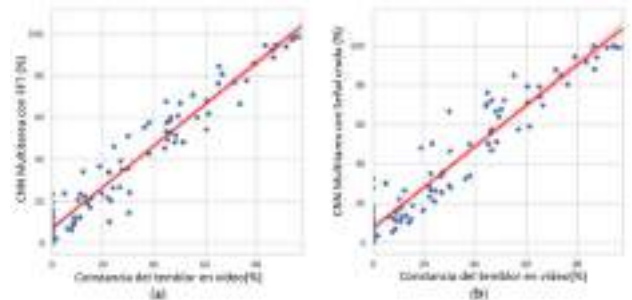


Figura 7. Correlación del temblor medido y obtenido con el modelo CNN multitarea.

3. CONCLUSIONES

En este documento, se presentan dos casos de uso en los que se han utilizado los sensores inerciales de los relojes inteligentes. Estos sensores permiten registrar la aceleración y velocidad angular que pueden ser utilizadas para aplicaciones de captura y análisis de movimiento con aplicación en diferentes ámbitos.

Por un lado, se expone el uso de estos dispositivos en el ámbito de la prevención de riesgos laborales, mediante el desarrollo de clasificadores mediante técnicas de inteligencia artificial que permite diferenciar la tarea que está ejecutando un trabajador, además del tipo de herramienta que utiliza.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible reconocer diferentes actividades en entornos laborales aplicando técnicas de inteligencia artificial mediante señales vibratorias. Además, se puede identificar el uso de tres máquinas vibratorias del tipo manual diferentes con una exactitud de hasta un 98%.

Por otro lado, en el ámbito de la salud, se ha presentado una herramienta que permite la evaluación y seguimiento de trastornos del movimiento relacionado con síntomas motores en pacientes de Parkinson.

Se ha demostrado que se puede identificar si un paciente presenta temblor y/o si está en reposo, con una precisión entre el 85 y 90%. Además, se puede realizar una evaluación de amplitud y constancia de dicho temblor en reposo, obteniendo una gran correlación entre los datos medidos por el especialista y los extraídos de los datos medidos, sentando las bases para el desarrollo futuro de un biomarcador digital.

Esta publicación es parte del Proyecto BIOCLITE PID2021-123708OB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE; y por las “Ayudas para contratos predoctorales para la realización del doctorado con mención internacional en sus escuelas, facultad, centros e institutos de I+D+i”, financiada por el Programa Propio I+D+i 2022 de la Universidad Politécnica de Madrid

4. REFERENCIAS

- [1] Jean-Michael, S., et al., «Market opportunities for advanced MEMS accelerometers and overview of actual capabilities vs. required specifications,» de *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, 2004.
- [2] Wright, R., et al., «Wearable Technology: If the Tech Fits, Wear It,» *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, vol. 11, pp. 204-216, 2014.
- [3] Page, T., «A Forecast of the Adoption of Wearable Technology,» *International Journal of Technology Diffusion*, vol. 6, n° 2, pp. 12-19, 2015.
- [4] TECAPARK, «<https://www.i2a2.upm.es/tecapark/>».
- [5] San-Segundo, R., et al., «Robust Human Activity Recognition using smartwatches and smartphones,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 72, pp. 190-202, 2018.
- [6] Zhang A., et al., «Automated Tremor Detection in Parkinson's Disease Using Accelerometer Signals,» de *Proceedings of the 2018 IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies*, New York, NY, USA, 2020.
- [7] Mahadevan, N, et al., «Development of digital biomarkers for resting tremor and bradykinesia using a wrist-worn wearable device,» *NPJ Digit Med*, 2020.
- [8] Hssayeni, M.D., et al., «Wearable Sensors for Estimation of Parkinsonian Tremor Severity during Free Body Movements,» *Sensors*, 2019.
- [9] Pavón, I., et al., «Wearable technology for occupational risk assessment: Potential avenues for applications,» de *Inter. Symposium Occupational Safety and Hygiene*, Guimarães, 2018.
- [10] Pavón, I., et al., «Wearable technology for occupational risk,» de *Occupational Safety and Hygiene VI, Proceedings of the 6th International Symposium on Occupation Safety and Hygiene (SHO 2018)*, Guimarães, Portugal, 2018.
- [11] Kritzler, M., et al., «Wearable technology as a solution for workplace safety,» *MUM 15: Proceedings of the 14th Int. Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, pp. 213-217, 2015.
- [12] South, T., *Managing noise and vibration at work*, London: Routledge, 2004.
- [13] Moschioni, G., et al., «Prediction of data variability in hand-arm vibration measurements,» *Measurement*, vol. 44, n° 9, pp. 1679-1690, 2011.
- [14] Ainsa, I., et al., «Experimental evaluation of uncertainty in hand-arm vibration measurements,» *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, n° 2, pp. 167-179, 2011.
- [15] Sigcha, L., et al., «Occupational risk prevention through smartwatches: Precision and uncertainty effects of the built-in accelerometer,» *Sensors*, vol. 18, n° 11, 2018.
- [16] Schober, P., et al., «Smartwatch based automatic detection of out-of-hospital cardiac arrest: Study rationale and protocol of the HEART-SAFE project,» *Resuscitation Plus*, vol. 12, 2022.
- [17] Gaiduk, M, et al., «Initial evaluation of substituting a sleep diary by smartwatch measurement,» *Procedia Computer Science*, vol. 207, pp. 3376-3383, 2022.
- [18] Şengül, G., et al., «Deep learning based fall detection using smartwatches for healthcare applications,» *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AED-0 Acústica en la edificación.

LABORATORY MEASUREMENTS OF LIGHTWEIGHT FLOATING FLOOR SYSTEMS ON CROSS-LAMINATED TIMBER (CLT) SLABS

Paulo Almeida Pinto^{1*}

Marina Inês Rodrigues²

Iñigo Arana Geonaga³

¹CDM Stravitec, Lisboa, Portugal

²CDM Stravitec, Overijse, Belgium

³CDM Stravitec, Barcelona, España

ABSTRACT

Mass timber family of products (including cross-laminated timber – CLT) offer an alternative to fossil fuel-intensive materials for many applications and an opportunity to reduce the carbon footprint of the built environment. However, the use of mass timber in multi-family and commercial buildings presents unique acoustic challenges. Additionally, one of the most desired aspects of mass timber construction is the ability to leave a building's structure exposed as finish, which creates the need for asymmetric assemblies. This means that when speaking about floor/ceiling applications, preferentially any acoustical component should be installed on top of the assembly. To measure airborne sound reduction and impact noise isolation of lightweight floating floor systems and confirm CLT assemblies can provide satisfactory sound insulation, CDM Stravitec launched a testing campaign (done on Belgian Building Research Institute, institution recognized by application of the decree-law of the 30th of January 1947), where measurements were made considering several types of decouplers, such as: discrete bearings with multiple thickness and/or different void depth (filled in totally or partially with insulation material) and mats and strips placed between the CLT slab and different timber, cement and gypsum-based boards with and without use of the well-known constrained layer damping technique.

Keywords — building acoustics, timber construction, cross-laminated timber, floating floors.

1. INTRODUCTION

Mass timber solutions, including cross-laminated timber (CLT), can be an excellent substitute to more traditional with high carbon footprint, very stiff, and heavy building materials, when some of their inherent properties aren't required. The use of these mass timber products allows for the reduction of the carbon footprint of the built environment. While CLT has many advantages as a sustainable building material, it can also pose some rather unique challenges in terms of acoustics.

Following the guide to airborne, impact, and structure-borne noise in Unitec Stated of American multifamily dwellings, 3 classes can be defined: entry (STC and IIC ≥ 50 dB), market (STC and IIC ≥ 55 dB) and luxury (STC and IIC ≥ 60 dB).

When doing the same exercise and locking at European criteria, most of the regulatory main requirements are showing $D_{nT,w} \geq 55$ dB [which, we could say, is close to $\approx R_w \geq 60$ dB] and $L'_{nT,w} < 52$ dB [which, we could say, is close to $L_{n,w} < 50$ dB].

If acoustical requirements are clearly defined, there are other dimensions of performance that the design team should consider when designing a floor/ceiling application, such as aesthetics, integration with other building services, type of finishing (defining deflection criteria), stability requirements and fire resistance (e.g., reason to have entirely filled cavities, to respect Chapter 7 of the International Building Code – IBC 2021).

One of the most desired aspects of mass timber construction is the ability to leave a building's structure exposed as finish, which creates the need for asymmetric assemblies. Consequently, when talking about floor/ceiling applications, it is preferable that any acoustic component be installed on top of the assembly.

* **Autor de contacto:** p.pinto@cdm-stravitec.com

Copyright: ©2023 Paulo Almeida Pinto et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Adding non-structural concrete as mass to a CLT structure isn't the optimal solution if the goal is to maintain all CLT benefits previously mentioned and reduce the carbon footprint of the building. Although it is an easy way to increase the mass and the overall construction stiffness. With that in mind, the leaving option to increase the acoustical overall performance is to add decouplers.

To measure airborne sound reduction and impact noise isolation of lightweight floating floor systems and confirm that CLT-assemblies can provide satisfactory sound insulation, CDM Stravitec conducted a test campaign at Buildwise.

2. TEST METHODOLOGY

2.1. Impact sound insulation of floors

Tests were carried out according to NBN EN ISO 10140 Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements [Part 1 (2021): Application rules for specific products (ISO 10140-1:2021); Part 3 (2021): Measurement of impact sound insulation (ISO 10140-3:2021) and Part 5 (2021): Requirements for test facilities and equipment (ISO 10140-5:2021)] and NBN EN ISO 717-2:2021 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements [Part 2: Impact sound insulation (ISO 717-2:2020)].

Measurements were taken from 50 to 5000 Hz and 100 to 3150 Hz was the frequency range for a rating in accordance with EN ISO 717-2.

Test were carried out on the bare 5-layer cross-laminated timber (CLT) slab, 180 mm (7-1/6") thick, over a surface of 260 cm x 442 cm (8.5-ft x 5.4-ft), with 210 mm (8-17/64") high elevated borders that simulate the surrounding walls of an actual floor slab. The test element was mounted according to the NBN EN ISO 10140-3 standard, in a similar manner to the actual construction, and tests were carried out on each system described in this paper.

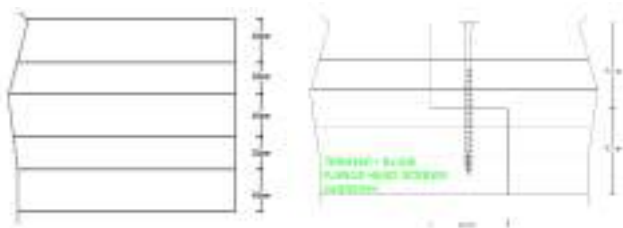


Figure 1. Layer structure of CLT 180 L5s and joint/screw detail of the slab.

As the standards ASTM E492-09 and EN ISO 10140-3 give similar procedures for the measurement and determination of the normalized impact sound pressure level L_n , the impact insulation class IIC was calculated based on the measured

values from 100 Hz to 3150 Hz, rounded to the nearest decibel, according to the ASTM E989-21 procedures.

Based on the normalized impact sound pressure levels, L_n , from 400 Hz to 3150 Hz, the high-frequency impact insulation class HIIC was calculated according to the procedure in the ASTM standard E3222-20a.

Based on the normalized impact sound pressure levels, L_n , in the 50, 63, and 80 Hz bands, the low-frequency impact insulation class LIIC was calculated according to the procedure in the ASTM standard E3207-21.

2.1. Airborne sound insulation of floors

Tests were carried out according to NBN EN ISO 10140:2021 Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements [Part 1: Application rules for specific products – Annex G: Acoustical linings – Improvement of airborne sound insulation (ISO 10140-1:2021); Part 2: Measurement of airborne sound insulation (ISO 10140-2:2021)] and NBN EN ISO 717-1:2021 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements [Part 1: Airborne sound insulation (ISO 717-1:2020)].

Measurements were taken from 50 to 5000 Hz and 100 to 3150 Hz was the frequency range for a rating in accordance with EN ISO 717-1.

The tests were carried out on a 5 layers cross-laminated timber (CLT) slab, above described, with 210 mm (8-17/64") high elevated borders that simulate the surrounding walls of an actual floor slab.

The test element was mounted according to the NBN EN ISO 10140-3 standard, in a similar manner to the actual construction, and tests were carried out on each system described in the results section.

A detailed description of the measurement method to determine the spectrum of the sound reduction improvement index of a lining on walls or floors can be found in the EN ISO 10140-1 standard and the EN ISO 10140-2 standard.

As the standards ASTM E90-09 and EN ISO 10140-2 give similar procedures for the measurement and determination of the sound transmission loss TL (ASTM) and the sound reduction index R (ISO), the sound transmission class STC is calculated based on the measured values from 125 Hz to 4000 Hz, rounded to the nearest decibel, according to ASTM E413-16.

3. TEST SETUP

The test floor [493 cm (16' 2-1/8") x 310 cm (10' 2-1/16")] is sandwiched between 2 heavy concrete ceiling elements by mineral wool compressed to 5 cm (1-15/16"). The test floor bears in its longitudinal direction and is laid on its short sides on the load-bearing walls of the test cell on an intermediate strip of mineral wool. The mobile room "M" is then installed

on top of the floor, but without making direct contact with the underlying receiving room. Within this source room, a metal frame adjustable in height and with underlying mineral wool filling shields the edges of the test floor and thus defines the test area [10 m² (107.6 sq ft)]. This test area corresponds to the unshielded ceiling area in the receiving room below, as visible in the cross section below. The remaining space between the mobile source room and the test elements is filled with compressed sound-absorbing wool to avoid sound leaks.



Figure 2. Details of mobile source room installation above the test floor (details without showing absorbing wool filling) and CLT slab installed between rooms.

4. TEST REUSLTS

Table 1. Section of setups tested

Setup	Section
A	
B	
C	
D	
E	
F	
G	
H	
I	
J	
K	

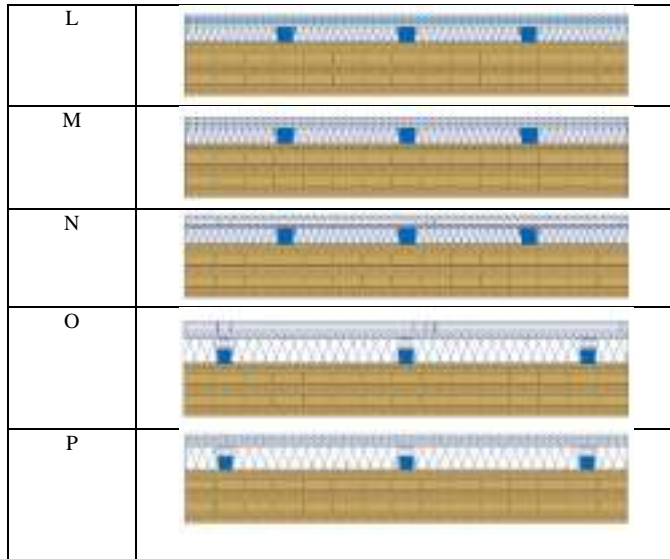


Table 2. Description of test setups.

Setup	Elastic Support	Dropper Ceiling	Dry Screed	Build-up Height ⁽¹⁾
A	Stravifloor Mat-W8 _a	n.a.	HydroFlam® 18 mm (11/16") + Damping Layer 5 mm (3/16") + OSB/3 18 mm (11/16")	49 mm (1-15/16")
B	Stravifloor Mat-W8 _a	Yes ⁽²⁾	HydroFlam® 18 mm (11/16") + Damping Layer 5 mm (3/16") + OSB/3 18 mm (11/16")	49 mm (1-15/16")
C	Stravifloor Mat-W8 _a	Yes ⁽²⁾	HydroFlam® 18 mm (11/16") + OSB/3 18 mm (11/16")	44 mm (1-3/4")
D	Stravifloor Mat-W25	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Fermacell® Powerboard H20 12.5 mm (1/2") + Plywood 19 mm (3/4")	75.5 mm (3")
E	Stravifloor Mat-W25 strips [o.c. 610 mm (24")]	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Fermacell® Powerboard H20 12.5 mm (1/2") + Plywood 19 mm (3/4")	75.5 mm (3")
F	Stravifloor Mat-W25 strips [o.c. 610 mm (24")]	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Plywood 19 mm (3/4")	63 mm (2-1/2")
G	Stravifloor Mat-W25	n.a.	Gypsum topping 50 mm (2")	75 mm (3")
H	Isolated Channel-M30 [Pad-M30 [30 mm (1-3/16")]]	n.a.	HydroFlam® 18 mm (11/16") + Fermacell® Powerboard H20 12.5 mm (1/2") +	78.5 mm (3-1/16")

	(o.c. 610 mm (24"))		OSB/3 18 mm (11/16")	
I	Isolated Channel-M30 [Pad-M30 [30 mm (1-3/16")]] (o.c. 610 mm (24"))	n.a.	HydroFlam® 18 mm (11/16") + OSB/3 18 mm (11/16")	66 mm (2-5/8")
J	Isolated Channel-M30 [Pad-M30 [30 mm (1-3/16")]] (o.c. 610 mm (24"))	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Plywood 19 mm (3/4")	68 mm (2-11/16")
K	Isolated Channel-M50 [Pad-M50 [50 mm (2")]] (o.c. 610 mm (24"))	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Damping layer 5 mm (3/16") + Plywood 19 mm (3/4")	93 mm (3-11/16")
L	Isolated Channel-M50 [Pad-M50 [50 mm (2")]] (o.c. 406 mm (16"))	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Damping layer 5 mm (3/16") + Plywood 19 mm (3/4")	93 mm (3-11/16")
M	Isolated Channel-M50 [Pad-M50 [50 mm (2")]] (o.c. 406 mm (16"))	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Plywood 19 mm (3/4")	88 mm (3-7/16")
N	Isolated Channel-M50 [Pad-M50 [50 mm (2")]] (o.c. 406 mm (16"))	n.a.	Plywood 15 mm (9/16") + Fermacell® Powerboard H20 12.5mm (1/2") + Plywood 15 mm (9/16")	100.5 mm (4")
O	Isolated Channel-M50 [Pad-M50 [50 mm (2")]] w/ 30 mm (1-3/16") overheight (o.c. 406 mm (16"))	n.a.	3x Fermacell® Powerboard H20 12.5mm (1/2") + Plywood 19 mm (3/4")	136.5 mm (5-3/8")
P	Isolated Channel-M50 [Pad-M50 [50 mm (2")]] w/ 30 mm (1-3/16")	n.a.	Plywood 19 mm (3/4") + Plywood 19 mm (3/4")	118 mm (4-5/8")

overheight (o.c. 406 mm (16"))			
--------------------------------------	--	--	--

⁽¹⁾ Not including bare slab or dropped ceiling if applicable.

⁽²⁾ 2 layers 12.5 mm (1/2") gypsum hung on metal grillage 150 mm (5.9").

Table 3. Results overview (global rating).

Setup	Dry Screed Load [kg/m ² (lbs/sq ft)]	L _{n,w} (C _i) [dB]	ΔL _w (C _{i,Δ}) [dB]	IIC	R _w (C;C _{tr}) [dB]	STC
A	26 (5.3)	67 (0)	23 (0)	43	50 (-1;-6)	50
B	26 (5.3)	53 (0)	35 (3)	57	64 (-2;-8)	64
C	22 (4.5)	53 (1)	34 (2)	56	63 (-2;-8)	64
D	46 (9.4)	61 (0)	27 (0)	49	53 (-1;-6)	54
E	36 (7.4)	56 (0)	32 (5)	54	59 (-3;-9)	60
F	23 (4.7)	60 (0)	28 (5)	50	55 (-2;-9)	56
G	92 (19)	65 (0)	21 (0)	45	56 (-1;-7)	57
H	35 (7.2)	54 (0)	34 (4)	56	62 (-2;-8)	63
I	26 (5.3)	57 (0)	31 (4)	53	60 (-3;-9)	60
J	23 (4.7)	57 (1)	30 (4)	52	59 (-3;-9)	60
K	28 (5.7)	55 (-1)	34 (2)	55	64 (-2;-8)	64
L	28 (5.7)	55 (-1)	35 (3)	55	63 (-2;-8)	63
M	23 (4.7)	55 (0)	34 (4)	55	62 (-3;-9)	62
N	32 (6.6)	54 (0)	35 (2)	56	63 (-2;-8)	63
O	52 (10.7)	47 (0)	42 (1)	63	67 (-2;-7)	67
P	23 (4.7)	53 (0)	36 (2)	57	65 (-2;-7)	66

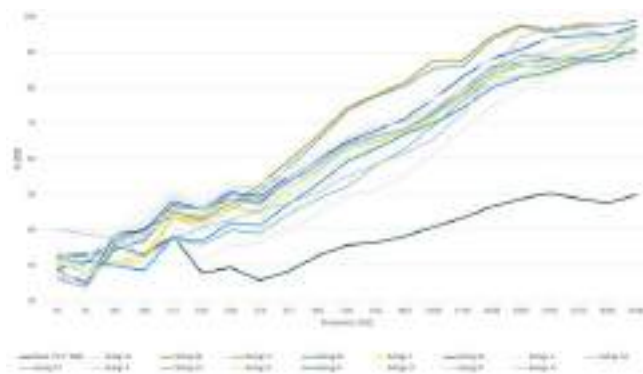


Figure 3. Airborne sound insulation of all setups tested.

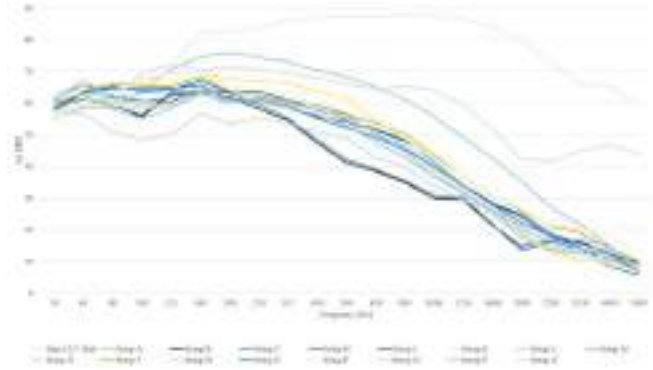


Figure 4. Impact sound insulation of all setups tested.

5. CONCLUSIONS

- There is an improvement on both, airborne and impact sound insulation around 14 dB due to the installation of a suspending ceiling. The improvement is across all frequencies > 80 Hz. For low frequencies, we can see a negative effect of the dropped ceiling. However, it is important to mention that the dropped ceiling installed isn't using resilient hangers or insulation material in the void, not being an acoustical dropped ceiling. The little negative effect of the dropped ceiling at low frequencies can be easily solved by adding insulation material in the void to avoid standing waves and using resilient hangers rather than stiff ones.

Ceilings might not always be visually appealing, especially when you can expose a timber structure instead, but they have several acoustic design functions that can lead to important cost savings, such as to control not only airborne and impact sound insulation but sound flanking (above partitions, via building services and structural penetrations or via structural elements), sound reverberation and noise of building services hung from the soffits.

- There is a significant improvement on both, airborne and impact sound insulation (around 3 dB) when using strips of 100 mm (2") Stravifloor Mat-W25 spaced of 610 mm (24") versus full surface support with the same resilient material.

- Full surface wet systems tested can perform up to 3 dB better in airborne noise insulation but having lower performance (up to 4 dB) in terms of impact noise insulation, with the most significant differences at frequencies above 160 Hz. The dry solutions have the added benefit of it being thinner and quicker to install.

- When comparing setups using discrete bearings with setups using mats as resilient support, there are improvements on airborne sound insulation up to 10 dB and 5-7dB on impact sound insulation, those improvements are visible across all frequency spectrum. The use of discrete bearings as resilient support of lightweight floor systems in combination

with well-designed dry screeds meant another step up in terms of acoustic isolation, especially at lower frequencies.

- The implementation of Fermacell® Powerboard H20, 12.5 mm (1/2'') thick and with a surface density of 13.5 kg/m² (2.77 lbm/sq ft), leads to an enhancement in both airborne and impact sound insulation by approximately 3 dB.

- In the current study, three types of wooden boards were used for testing, namely HydroFlam®, OSB/3, and plywood. HydroFlam® is a P5 chipboard that exhibits moisture resistance, fire retardancy (standard performance of B-s1, d0), and structural integrity, with 89% of its materials being renewable and 95% being recycled wood. OSB/3 is a versatile panel with good mechanical strength, stiffness, and durability under temporary humid conditions, and standard fire reaction performance of D-s2, d0. Plywood, on the other hand, is a wood-based material composed of multiple thin layers of wood veneers glued crosswise to normalize material properties such as shrinkage and swelling behaviour.

Comparing the results obtained in this study, we observed no significant differences in acoustic performance among the test setups that differed only in the type of wooden board used. This finding can be attributed to the similarity in thickness and density of the boards, even when changing the board typology (OSB combined with HydroFlam® vs. plywood). Therefore, the selection of the type of wooden panel for an acoustic floating floor should depend more on other functional requirements such as mechanical resistance, differential deflection, humidity resistance, and fire resistance, rather than on acoustic properties alone. The choice of the most commonly available board in the market should also be considered.

- In this study, the acoustic performance of test setups with channel spacing of 406 mm (16'') and 610 mm (24'') between bearings, while maintaining a constant distance of 500 mm (20'') between bearings in the other direction, was investigated. Results showed that there was no significant difference in acoustic performance for frequencies starting from 50 Hz.

Apart from board thickness, number, and type, the spacing between bearings is often restricted by load conditions and acceptable deflection criteria, which are essential for certain types of floor coverings. Such limitations are observed in multiple instances.

- In the context of lightweight acoustic floor systems, the distribution of loads towards the supporting structural floor is ensured by the use of lightweight panelling, which provides bending stiffness to the floor system. Wood-based panels are preferred due to their optimal ductility/strength ratio and low radiation efficiency. However, these panels exhibit dips in transmission loss in the resonance and coincidence-controlled regions. This issue can be addressed by using constrained layer damping (CLD) techniques with high damping viscoelastic acoustic membranes, known as damping layers. The added damping layer works by

converting mechanical energy into heat, thus reducing noise and vibration radiation under impact loads.

In this study, it was found that there was no significant difference between results of test set-ups with and without damping layer, except for slightly better results at the lowest end of available data (<50 Hz) and higher transmittance above 800 Hz. This is due to the fact that the impact generated by the standardized tapping machine used in the tests was not sufficient to generate high shear loads in the damping layer. Therefore, no significant energy was lost in this layer during the tests. However, it is expected that for higher loads, the panels and damping materials will be more compressed, resulting in a higher deformation and shear deformation and a more pronounced benefit of the use of constrained layer damping.

- Comparing the setups utilizing 30 mm (1-3/16'') bearings with those using 50 mm (2'') bearings, it has been observed that there is a 2-3 dB improvement in airborne sound insulation as well as in impact sound insulation. It is noteworthy that the improvements are predominantly observed in the low frequency range due to the overall stiffness of the system and the increase in void resulting in reduced impact of stiffness of the entrapped air.

- Increasing the air void between the floating floor system and the supporting structural floor from 50 mm (2'') to 80 mm (3-1/8'') results in a noticeable enhancement in both airborne and impact noise insulation. The shift of the R_w curve towards the left at lower frequencies confirms this observation. This can be attributed to the reduction in air spring stiffness, as the air void becomes larger.

- A system can be designed with a total build-up height (excluding slab) of 135.5 mm (5-5/16''), by combining an acceptable number of boards to achieve a high surface load of 2 kg/m² (10.51 lbm/sq ft) with an overheight of 30 mm (1-3/16'') and pads of 50 mm (2''). This system can achieve global values of $L_{n,w} = 47$ dB, $IIC = 63$ dB, $R_w = 67$ dB, and $STC = 67$ dB.

- Comparing setups using 2 plywood boards and dry screed (setup P) with setups using a plywood board combined with 3 layers of Fermacell (O), an influence can be observed on sound insulation at low frequencies due to the added surface mass.

12. REFERENCIAS

- [1] International Building Code, Chapter 7 Fire and Smoke Protection Features, accessed on 03/14/2023.
- [2] McLain, Richard, Acoustics and Mass Timber: Room-to-Room Noise Control. WoodWorks, 2018.

MEDICIÓN DE PARÁMETROS MECÁNICOS DE NUEVOS ECO-MATERIALES PARA MODELOS DE PREDICCIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

Romina del Rey Tormos^{*1}

Jesús Alba Fernández¹

Víctor Atienza Soler¹

¹ Escola Politècnica Superior de Gandía. Centro de Tecnologías Físicas. Universitat Politècnica de València. c/Paranimf, 1. 46730, Grao de Gandía, España.

RESUMEN

En este trabajo se propone un procedimiento experimental basado en métodos resonantes para la caracterización mecánica de nuevos eco-materiales. La necesidad de incorporar nuevos materiales ecológicos en la ingeniería de la construcción es cada día más urgente, siguiendo el camino marcado por la Unión Europea H2030. La normativa vigente para determinar parámetros mecánicos de materiales, está pensada para materiales homogéneos e isotrópicos, características que no suelen poseer los nuevos eco-materiales, por su propia naturaleza. Es necesario conocer los parámetros mecánicos para poder evaluar modelos de predicción de aislamiento acústico en la edificación. En este trabajo se muestran resultados comparativos de parámetros mecánicos obtenidos a partir de métodos normativos (ISO) y obtenidos a partir de un procedimiento experimental basado en métodos resonantes. Se presentan también valores del aislamiento acústico a ruido aéreo de estos nuevos eco-materiales, en función de los parámetros mecánicos obtenidos.

ABSTRACT

This work proposes an experimental procedure based on resonant methods for the mechanical characterization of new eco-materials. The need to incorporate new ecological materials in construction engineering is becoming increasingly urgent, following the path set by the European Union H2030. The current regulations for determining mechanical parameters of materials are designed for homogeneous and isotropic materials, characteristics that are not typically found in new eco-materials due to their nature. It is necessary to know the mechanical parameters in order to evaluate predictive models for sound insulation in buildings. This work presents comparative results of mechanical parameters obtained from normative methods (ISO) and obtained from an experimental procedure based on resonant methods. It also presents values of airborne sound insulation of these new eco-materials, based on the determined mechanical parameters.

Palabras Clave— eco-materiales, frecuencia de resonancia, módulo de young, aislamiento acústico.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de incorporar nuevos materiales ecológicos en la ingeniería de la construcción es cada día más urgente, siguiendo el camino marcado por la Unión Europea [1]. En los laboratorios de acústica del Centro de Tecnologías Físicas del Campus de Gandía, de la Universitat Politècnica de València, se busca trabajar por una economía verde y un desarrollo sostenible, de forma que nuevos eco-materiales puedan ser introducidos en el ámbito de la ingeniería civil, aportando beneficios sociales y medioambientales. Ya existen estudios previos de nuevos materiales obtenidos a partir de reciclado de productos o de fibras naturales [2-8]. De esta forma, a través de la transformación ecológica es posible llegar a una economía verde y circular. Con el desarrollo de estas nuevas soluciones es posible ayudar a acabar o disminuir la pobreza (ODS1): Existen algunas zonas del planeta, donde plantas consideradas como maleza o especies invasivas pueden ser una opción de crecimiento económico sostenible y trabajo decente (ODS 8), algunos ejemplos son la planta *Eryngium paniculatum* en gran parte de Chile, o en la Comunidad Valenciana, la gestión sostenible de los residuos de la recolección del cultivo de arroz, evitando generar toneladas de CO a la atmósfera (ODS 3, ODS 13). El poder validar estos nuevos materiales como parte de soluciones acústicas, además reduciría desigualdades entre países o regiones (ODS 10). Las soluciones elaboradas a partir de fibras naturales, o de residuos (base reciclada) servirán para combatir problemas de ruido en edificación o ingeniería civil (ODS3), así como también contemplarán aspectos térmicos (ODS 7), fomentarán la innovación (ODS 9), con una producción sostenible (ODS 12) hacia el diseño de ciudades sostenibles (ODS 11).

Todas estas soluciones deberán cumplir con las normativas de construcción en vigor. A nivel estatal es el Código Técnico de la Edificación (CTE) [9], desarrollado por disposición de la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE) a través de los Documentos Básicos la que regula las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios y sus instalaciones. Es necesario pues un re-enfoque de soluciones tecnológicas, normativa y modelado, ya que, la mayoría de modelos, de prototipos tecnológicos y de normativa vigente, al menos en el ámbito de la construcción, están pensados para el uso de materiales

* **Autor de contacto:** roderey@fis.upv.es.

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

“tradicionales”. Los materiales tradicionales suelen ser homogéneos e isotrópicos, características que no presentan los nuevos eco-materiales, por su propia naturaleza. Son muchos los autores que han evaluado los parámetros mecánicos de nuevos materiales sostenibles mediante normativas “clásicas” (ISOS) [10,11], con éxito [12-19], estos ensayos suelen ser destructivos. En los laboratorios de acústica del Campus de Gandia de la Universitat Politècnica de València, con el desarrollo de nuevos materiales, en muchas ocasiones, ni se cuenta con suficiente cantidad de muestra, ni se pueden conseguir las probetas de las dimensiones marcadas por la normativa [10,11]. En este trabajo se propone un procedimiento experimental basado en métodos resonantes para la caracterización mecánica de nuevos eco-materiales. Todas las probetas utilizadas son muestras circulares de 80mm de diámetro. Se obtiene el módulo de Young a partir de curvas de resonancia en función de la frecuencia de algunas muestras eco-sostenibles y de otras muestras de materiales clásicos, que se toma como referencia. A partir del valor del módulo de Young, se obtiene el factor de pérdidas y es posible, a partir de modelados de aislamiento acústico a ruido aéreo obtener el índice de reducción sonora R (dB).

2. MÉTODO RESONANTE

El procedimiento experimental utilizado se basa en el cálculo de la función de transferencia en función de la frecuencia $H(f)$ entre desplazamiento, y fuerza:

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (1)$$

Siendo: X(f) el desplazamiento en función de la frecuencia (m) y F(f) la fuerza en función de la frecuencia (N).

Se excita con un shaker la muestra (fuerza) sometida a estudio y se registra con un acelerómetro la aceleración. A partir de las medidas de aceleración, se obtienen valores de desplazamiento, con dos pasos de integración. Las posiciones tanto de shaker como de acelerómetro han sido estudiadas con detalle para ver en que posiciones de excitación/registro se obtenía menor dispersión de las medidas. En la Figura 1 se muestra el dispositivo de ensayo, en la Figura 2 se muestra en detalle una de las muestras utilizadas para la puesta a punto de este procedimiento de ensayo.

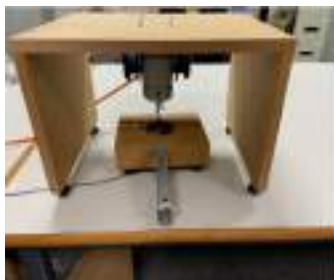


Figura 1. Dispositivo (plataforma) de ensayo para la obtención de parámetros mecánicos.



Figura 2. Detalle de una de las muestras de ensayo. Ejemplo de matriz de divisiones en una muestra para evaluación de la dispersión de los ensayos.

En la Figura 3 se muestra una curva experimental como ejemplo. En la ecuación (2) se muestra la relación entre la frecuencia de resonancia y la rigidez dinámica, k:

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

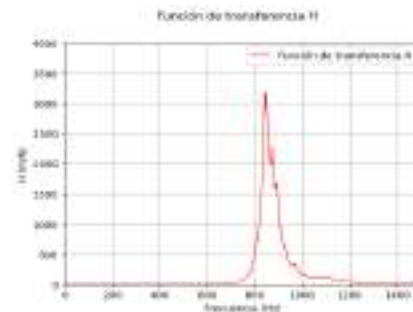


Figura 3. Función de transferencia experimental.

Reescribimos la ecuación en función de la frecuencia de resonancia, f_0 (Hz) como, (siendo m la masa de la muestra en Kg):

$$k = 4 \cdot m \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \quad (3)$$

A partir de la f_0 y de la caída en (+/-) 3 dB (Δf_{3dB}) también es posible conocer el valor del factor de pérdidas, η , adimensional:

$$\eta = \frac{\Delta f_{3dB}}{f_0} \quad (4)$$

Es posible conocer el valor del Módulo de Young, E (Pa) a partir de la ecuación (5):

$$E = \frac{0.99 \cdot a^4 \cdot f_n^2 \cdot \rho}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2} \quad (5)$$

Siendo: a el radio de la placa (m), f_n es la frecuencia de resonancia del material en las condiciones de ensayo, ρ la densidad del material (Kg/m^3), c un coeficiente que depende de las condiciones de

contorno (0.172) [20], n el número de modo de la placa con valor 1 y e_0 el espesor de la placa (m).

3. RESULTADOS MECÁNICOS

3.1. Materiales utilizados.

Se muestran en este trabajo los resultados de valores de parámetros mecánicos obtenidos mediante el método resonante expuesto en el apartado anterior de 3 materiales; dos de estos materiales son eco-materiales elaborados a partir de fibras naturales (fibras de naranjo y fibras de yute) y un tercer material elaborado de yeso común. Se ha decidido utilizar también en el estudio un material comúnmente utilizado en la edificación para poder tener sus valores como referencia. En la Figura 5 se muestran las probetas de estos materiales utilizadas en los ensayos de parámetros mecánicos.



Figura 5. Muestras utilizadas en el estudio de la obtención de parámetros mecánicos a partir del método resonante.

Algunas características de estas muestras se detallan a continuación.

- Composite elaborado a partir de fibras de naranjo (MP30%): composite elaborado a partir de una matriz polimérica, un 30% de fibras naturales de naranjo y un 6% de pasta mecánica con un compuesto orgánico. La placa sometida a ensayo es una probeta circular de 80 mm de diámetro, 4 mm de espesor y 2323 kg/m³ de densidad.
- Composite elaborado a partir de fibras vegetales de yute: composite elaborado a partir de fibras de yute (densidad de fibras de 0.70%) y resina epoxy para laminación comercial. La placa sometida a ensayo es una probeta circular de 80mm de diámetro, 5 mm de espesor y 2293 kg/m³ de densidad.
- Placa de yeso: placa de yeso comercial de 13mm de espesor y 80 mm de diámetro, con dos capas de celulosa para ofrecer un mejor acabado en la instalación habitual. Tiene una densidad de 1128 kg/m³.

3.2. Parámetros mecánicos obtenidos mediante el método resonante.

Para obtener los parámetros mecánicos a partir del método resonante de los 3 materiales elegidos, se realiza un promedio de 6401 registros de acelerómetro/shaker por probeta. Se ha seguido un mapeado de posiciones siguiendo la matriz de divisiones que se observa en la Figura 2. Al menos, se han utilizado 3 probetas por cada material, y los ensayos se han realizado en distintas

disposiciones de la plataforma de ensayo, determinando que los ensayos con menor dispersión han sido los elaborados con la plataforma en el suelo (y no sobre una mesa), evitando así posibles transmisiones de la vibración o la aparición de ondas transversales por los efectos de borde de las mesas de trabajo.

En la Tabla 1 se muestran los resultados experimentales del módulo de Young y del factor de pérdidas. En la misma tabla se muestran los valores del módulo de Young de referencia. El error asociado a los valores experimentales se ha obtenido a partir de la teoría básica de errores.

Tabla 1. Tabla comparativa de resultados experimentales y valores de referencia de los parámetros mecánicos.

Material	E Referencia [GPa]	E Experimental. [GPa]	Loss Factor
Composite Fibras Naranjo (MP30%)	3,7	4 ± 0,5	0,106
Composite Fibras Yute	2,5 ± 0,1	3,2 ± 0,3	0,040
Placa Yeso	0,35 ± 0,07	0,34 ± 0,02	0,022

Los valores del módulo de Young (E) de referencia que se muestran en la segunda columna de la Tabla 1, se han obtenido de las siguientes fuentes:

- Valor del módulo de Young de referencia de la placa de composite de fibras de naranjo (MP30%): Estudio detallado en [7] donde se realizó el ensayo mecánico destructivo siguiendo la norma americana ASTM D638 standard.
- Valor del módulo de Young de referencia de la placa de fibras de yute: ensayos realizados en la Escuela Politécnica Superior de Alcoy-Universitat Politècnica de València, según [11].
- Valor del módulo de Young de la placa de yeso: [21]

4. ESTIMACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

Es posible conocer el índice de reducción sonora, R (dB), a partir del coeficiente de transmisión, $\tau(\theta)$. Este coeficiente representa la relación entre la energía transmitida y la energía incidente, y presenta una dependencia con el ángulo de incidencia.

Siguiendo las directrices marcadas en otros autores [7,22 ,23] y el procedimiento detallado en [24], se obtiene la predicción al aislamiento acústico de las placas de fibra de naranjo, de fibras de yute y de yeso. En la Figura 6 se muestran estos resultados. En la Figura 7 se muestran los resultados de los valores de aislamiento a ruido aéreo, de las simulaciones considerando las 3 placas del

mismo espesor, 13mm, valor típico de las placas de yeso comúnmente utilizadas en edificación.

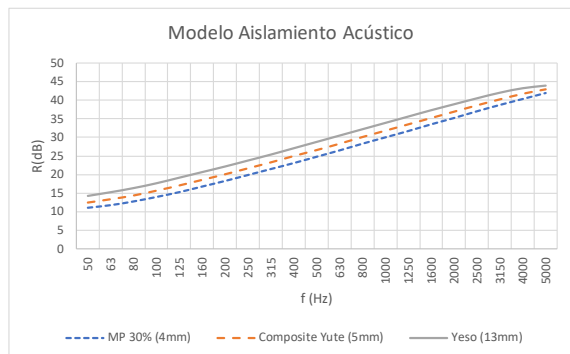


Figura 6. Estimación del aislamiento acústico a ruido aéreo, R (dB) de las 3 placas estudiadas en este trabajo.

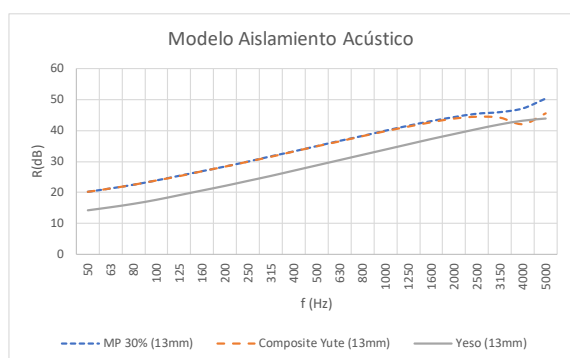


Figura 7. Estimación del aislamiento acústico a ruido aéreo, R (dB) de las 3 placas estudiadas en este trabajo, considerando todas las placas de 13mm de espesor.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un procedimiento experimental basado en métodos resonantes para la caracterización mecánica de nuevos eco-materiales. A partir del método propuesto se han podido obtener valores del módulo de Young de tres materiales distintos bastante similares a los valores que se tenían de referencia obtenidos por distintos métodos. Este trabajo ha servido para poner en marcha un nuevo método resonante no destructivo y adaptado a la geometría de las probetas que suelen llegar a nuestros laboratorios. A partir de los valores experimentales, además, podemos obtener el factor de pérdidas que, junto a parámetros mecánicos, nos permite estimar el valor del aislamiento acústico a ruido aéreo, R(dB). Estas predicciones han demostrado que, con un mismo espesor, las placas de eco-composites (en concreto de fibras de naranjo y fibras de yute) pueden presentar valores de aislamiento acústico comparables, e incluso superiores a los valores de aislamiento que presentan las placas de yeso, tradicionalmente utilizadas en acústica de la edificación, como parte de soluciones acústicas. Se abre de esta forma un abanico de posibilidades de nuevas soluciones acústicas sostenibles, apostando por una economía circular y en línea con la estrategia de la Unión Europea (H2030).

12. REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, “Transformar nuestro mundo: La agenda 2030 para Desarrollo Sostenible”, 2015, <<https://sdgs.un.org/es/2030agenda>> [Consulta: 12 de septiembre de 2013].
- [2] J. Ramis, R. del Rey, J. Alba, L. Godinho, J. Carbajo. “A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber”. *Materiales de Construcción*, vol. 313, no.64, pp. 1 – 7, 2014.
- [3] R. del Rey, J. Alba, V. Sanchis. “An empirical modeling of porous sound absorbing materials made of recycled foam”, *Applied Acoustics*, vol. 73, pp. 604 – 609, 2012.
- [4] R. del Rey, J. Alba, J. Ramis, V. Sanchis, “Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico”. *Materiales de Construcción*, vol. 61, no. 304, pp. 547 – 558, 2011.
- [5] J. Ramis, J. Alba, R. del Rey, E. Escuder, V.J. Sanchis. Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf, *Materiales de Construcción*, vol. 60, no. 299, pp. 133 – 143, 2010.
- [6] R. Reixach, R. del Rey, J. Alba, G. Arbat, F.X. Espinach, “Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated gypsum boards”, *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 124 – 129, 2015.
- [7] J. Jorge, R. del Rey, J. Alba, R. Oltra, “Sound-Absorption Properties of Materials Made of Esparto Grass Fibers”. *Sustainability*, vol. 12, no. 14, pp. 5533, 2020.
- [8] R. del Rey; A. Uris; J. Alba; P. Candelas, “Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications”, *Materials*, vol. 10, no. 11, pp. 1277, 2017.
- [9] Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación (DB-HR del CTE)
- [10] AENOR (2020). “Materiales metálicos, Ensayo de tracción, Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.”. UNE-EN ISO 6892-1:2020. Madrid: AENOR.
- [11] AENOR (2022). “Plásticos, Determinación de las propiedades en tracción, Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras.”, UNE-0EN ISO 527-4:2022. Madrid: AENOR.
- [12] M. Peydró, F. Parres, J. Crespo, R. Navarro, “Recuperación de plásticos reciclados mediante adición de elastómeros termoplásticos. Caracterización mecánica y térmica”, *Tecnología de materiales*, vol. 87, no. 5, pp. 526-532, 2012.
- [13] J. Gomez-Caturla, R. Balart, J. Ivorra, D. Garcia, F. Dominici, D. Puglia and T. Luigi, “Biopolypropylene-Based Wood Plastic Composites Reinforced with Mango Peel Flour and Compatibilized with an Environmentally Friendly Copolymer from Itaconic Acid,” *ACS applied polymer materials*, vol. 4, no. 6, pp. 4398–4410, 2022.

[14] J. Gomez-Caturla, D. Lascano, N. Montanes, R. Balart, F. Dominici, D. Puglia and L. Torre, “Manufacturing and characterization of highly environmentally-friendly composites with polylactide matrix /and mango kernel seed flour”, *Express polymer letters*, vol. 17, no. 3, pp. 334–351, 2023.

[15] D. García García, A. Carbonell Verdú, A. Jorda-Vilaplana, R. A. Balart Gimeno, and D. García Sanoguera, “Development and characterization of green composites from bio-based polyethylene and peanut shell”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, no.37, 2016.

[16] C. Dolça, E. Fages, E. Gongá, D. Garcia-Sanoguera, R. Balart, and L. Quiles-Carrillo, “The Effect of Varying the Amount of Short Hemp Fibers on Mechanical and Thermal Properties of Wood-Plastic Composites from Biobased Polyethylene Processed by Injection Molding”, *Polymers*, vol. 14, no. 1, pp. 138, 2021.

[17] Á. Agüero, E. Corral, S. Abarca, D. Lascano, M. de la Fuente, M. Peltzer, R. Balart and M. Arrieta, “Plasticized Mechanical Recycled PLA Films Reinforced with Microbial Cellulose Particles Obtained from Kombucha Fermented in Yerba Mate Waste”, *Polymers*, vol. 15, no. 2, pp. 285–, 2023.

[18] M. D. Samper Madrigal, R. Petrucci, L. Sánchez Nacher, R. A. Balart Gimeno, and J. M. Kenny, “Properties of composite laminates based on basalt fibers with epoxidized vegetable oils”, *Materials & Design*, vol. 72, pp. 9-15, 2015.

[19] D. S. Lascano-Aimacaña, R. Balart, D. Garcia-Sanoguera, Á. Agüero-Rodríguez, T. Boronat, and N. Montanes, “Manufacturing and Characterization of Hybrid Composites with Basalt and Flax Fabrics and a Partially Bio-based Epoxy Resin”, *Fibers and Polymers*, vol. 22, no.3, pp. 751-763, 2021.

[20] M. Recuero Lopez, “Ingeniería Acústica”, *Ediciones Paraninfo*, S.A, Madrid, septiembre de 1991.

[21] Alonso Vera, Juan Antonio; Reyes Pozo, Encarnación; Gálvez Ruiz, Jaime. (2011) Caracterización del comportamiento en fractura de paneles sándwich de placas de yeso laminado y lana de roca, En: “XXVIII Encuentro del Grupo Español de Fractura”, 06/04/2011 - 08/04/2011, Gijón, España.
<<https://gef.es/images/publicaciones/28/Anales28-011.pdf>>
[Consulta: 11 de septiembre de 2023].

[22] T.E. Vigran, “Predicting the sound reduction index of finite size specimen by a simplified spatial windowing technique”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 325, no. 3, pp. 507-512, 2009.

[23] S. Schoenwald, E. Gerretsen, and H. J. Martin, “Prediction of the Sound Transmission Loss of Multi-layered Small Sized Elements”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5_Supplement, pp. 3500–, 2008.

[24] J. Sanchis, Ernesto; R. Rey; L. Bertó; J. G. Segura; J. Gadea; J. Alba. Preliminary Results of the Research Project Entitled “Development of New Eco-materials and Sustainable Solutions based on the Use of Waste and Renewable Raw Materials in Building Acoustics”. *EN 22nd International Congress on Sound and Vibration, Acoustical Society of Italy*, (Florencia, Italia), vol. 1 – 8, 2015.

EVOLUCIÓN EN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE LAS VENTANAS UTILIZADAS EN VIVIENDAS

Susana Lopez de Aretxaga Escudero^{1,2*}
María José de Rozas López^{1,2}

¹TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Parque Científico y Tecnológico de Gipuzkoa. Mikeletegi Pasealekua, 2, 20009 Donostia-San Sebastián (Gipuzkoa) España

²Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco; Dirección de Vivienda, Suelo y Arquitectura; Dpto. de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes. C/ Aguirrelanda, 10, 01013 VITORIA-GASTEIZ (Araba-Álava) España.

RESUMEN

El hueco de fachada, entendido como el conjunto de ventana, cajón de persiana y, en ocasiones, rejilla de ventilación, es un elemento vital en la protección frente al ruido de los usuarios de viviendas. Desde la entrada en vigor de DB-HR del CTE y, posteriormente, la Orden de Control Acústico del País Vasco, aumentan las promotoras y constructoras que desean verificar el aislamiento de estos sistemas previo a su colocación en obra, y garantizar la prestación establecida en proyecto. Debido a esto, el Área de Acústica del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco dispone de un alto número de datos experimentales de aislamiento acústico, ensayados por Tecnalia. Valores acústicos analizados desde distintos puntos de vista, para visibilizar la evolución de este tipo de sistemas y la influencia de sus componentes.

Esta comunicación presenta el análisis, los resultados y las conclusiones de dicho estudio.

ABSTRACT

The façade opening, understood as the set of window, rolling shutter and, sometimes, air-inlet, is an important element to protect the users of a dwelling against the noise. Since DB-HR of CTE came into force, and afterwards, the Order of Acoustic Control of the Basque Country, the number of development and construction companies that wish to verify the sound insulation of these systems before placing them on site, with the purpose of guarantee the performance established in the project, has increased. Due to this fact, many sound insulation experimental data are available in the Acoustics Area of the Laboratory for Building Quality Control of the Basque Government, tested by Tecnalia.

Acoustic data analyzed from different points of view, to make visible the evolution of this type of systems and the influence of their components.

This communication presents the analysis, results, and conclusions of this study.

Palabras Clave— Ventanas, aislamiento acústico, viviendas.

1. INTRODUCCIÓN

El hueco de fachada, entendido como el conjunto de ventana, cajón de persiana y, en ocasiones, sistemas de admisión de aire, es un elemento vital en la protección frente al ruido de los usuarios de las viviendas.

Es un elemento complejo debido a los múltiples y variados componentes que influyen en su aislamiento acústico: vidrio, perfilera, tamaño, cierres, tipo de cajón, etc.

2. EL HUECO DE FACHADA Y SU CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

La caracterización acústica del hueco de fachada, previo a la entrada en vigor del DB-HR del CTE [1] se centraba en la ventana y en su valor de aislamiento acústico R_A , dado que se exigía un aislamiento mínimo de 30 dBA (R_A) al cerramiento de la fachada.

Los fabricantes de ventanas, para la declaración de prestaciones acústicas de acuerdo con la norma de producto UNE-EN 14351-1:2006+A2:2017 [2] para el mercado CE [3], realizan los ensayos iniciales de tipo de aislamiento a ruido aéreo sobre ventanas de 1,23 x 1,48 m.

Con la entrada en vigor del DB-HR del CTE [1] y para garantizar al usuario de la vivienda la protección frente al

* **Autor de contacto:** susana.lopezdearetxaga@tecnalia.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

ruido exterior, se establece en fase de diseño el valor mínimo de aislamiento acústico, $R_{A, tr}$, que debe cumplir el hueco de fachada, incluyendo todos los elementos del hueco: cajón de persiana, etc. Este valor mínimo, $R_{A, tr}$, se puede establecer aplicando la opción simplificada del DB-HR del CTE [1].

Se empieza a incorporar a la ventana el cajón de persiana ‘monoblock’ y se ensayan ventanas con cajón de persiana con el paño subido. A partir de 2011, la familia de norma de ensayos de aislamiento acústico en laboratorio establece en el anexo I de la norma UNE-EN ISO 10140-1 [4], la realización de los ensayos de ventanas que incorporan persiana con ésta repliegada y extendida. El requisito de aislamiento acústico al hueco de fachada, $R_{A, tr}$, establecido en el DB-HR del CTE se asocia a la situación de paño de persiana subido [5].

Así mismo, la incorporación de requisitos de calidad de aire en el interior de las viviendas en el CTE [6] puede llevar al uso en las carpinterías exteriores de un sistema de admisión de aire, en adelante aireador, que repercute en el aislamiento acústico del sistema.

La determinación del aislamiento acústico de un hueco de fachada concreto se obtiene mediante ensayo en laboratorio [7][8] de todo el conjunto y también existe la opción de estimar su valor aplicando la norma UNE-EN ISO 12354-1 [9], a partir del aislamiento suministrado por los fabricantes de cada uno de los componentes [7] [8] [10]:

- Cajón de persiana: $D_{ne,w}(C;C_{tr})$ ó $R_w(C;C_{tr})$
- Ventana: $R_w(C;C_{tr})$:
 - Vidrio
 - Juntas
 - ...
- Rejilla de ventilación: $D_{ne,w}(C;C_{tr})$

Desde la publicación de la Orden de control acústico de la edificación, en 2016 [11], la verificación acústica in situ de las viviendas del País Vasco es de obligado cumplimiento; sin embargo, promotoras públicas, como VISESA y también privadas de Euskadi, ya integraban previamente en su control de calidad, la verificación en laboratorio de los huecos de fachada, como fase previa a la posterior verificación del aislamiento acústico de la fachada en la obra terminada

El control del aislamiento acústico de las ventanas, que se diseña y/o instalan en obra, se realiza sobre la ventana en su tamaño y composición real (puntos de cierre, ajuste, tamaño de cajón de persiana, etc).

3. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DEL HUECO DE FACHADA

3.1. Datos analizados

Se ha realizado el estudio de los resultados de 286 configuraciones de hueco de fachada, ensayados según la norma UNE-EN ISO 10140-2 [8] o UNE-EN ISO 140-3) [7], en el Área Acústica del Laboratorio de Control de la Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco gestionada por Tecnalia.

La tipología de ventanas ensayadas es muy variada en cuanto al tamaño, material de perfilería (aluminio, PVC, etc.), número de puntos de cierre, tipología de hojas (practicables, correderas, correderas elevables, con o sin hojas fijas añadidas). 183 de las configuraciones analizadas disponen de cajón de persiana y 44 de aireador.

El parámetro analizado es el índice global de aislamiento al ruido exterior de tráfico, $R_w + C_{tr}$, según norma UNE-EN ISO 717-1 [10] denominado en adelante $R_{A, tr}$, por considerarse el más representativo respecto a los requisitos establecidos en el DB-HR del CTE.

Se ha establecido el rango de aislamiento acústico obtenido en función de los componentes del hueco, el objeto de los ensayos, y se ha comparado con los rangos de aislamiento acústico actuales requeridos a los huecos de fachada. Así mismo se ha analizado la influencia de la colocación del paño de persiana en el aislamiento del hueco, y se ha establecido el rango de variación del índice global $R_{A, tr}$ frente al utilizado anteriormente y también en la actualidad, R_A .

3.2. Rango de aislamiento requerido

El requisito mínimo exigido al conjunto ventana, dependerá del nivel de ruido exterior L_d , el aislamiento de la parte ciega de la fachada, la superficie del hueco,Se indican los requerimientos mínimos de $R_{A, tr}$ para el hueco de fachada recogidos en la tabla 3.4 del DB-HR-Opción simplificada, para el caso de dormitorios (para salones, los requisitos son iguales o menores), que comprenden un rango de 25 dBA a 49 dBA. Si se quisiera considerar ruido de aeronaves, los requisitos se incrementarían en 4 dBA.

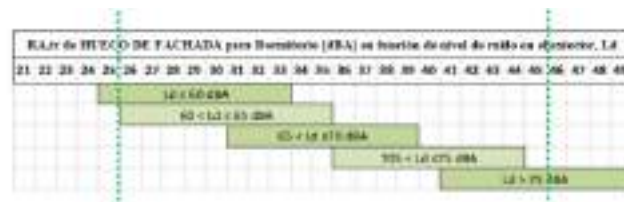


Gráfico 1. Rango de aislamientos mínimo $R_{A, tr}$ exigidos al hueco de ventana de dormitorio, en función de L_d , tamaño hueco y aislamiento parte ciega fachada. Opción simplificada DB-HR de CTE.

3.3. Objeto de los ensayos: control de obra

Un 71% de los casos analizados corresponden a ensayos de control de obra. 204 conjuntos de ventanas ensayados previo a su colocar en viviendas en construcción, solicitados por promotoras, constructoras o laboratorios de control de calidad, entre el 2010 y 2023.

Se han analizado 286 datos de huecos de fachada, respecto al índice de ruido de tráfico $R_{A, tr}$. 204 datos

corresponden a ensayos de control de obra y el resto, 82 huecos, son datos de fabricantes.

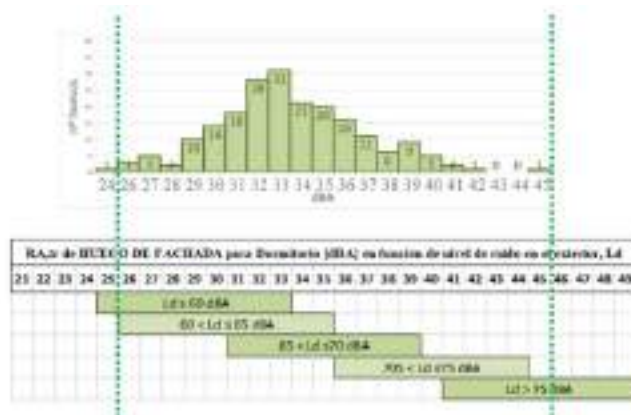


Gráfico 2. Control de obra. Distribución de $R_{A,atr}$ de las 204 composiciones de huecos de fachada. Comparación frente a requisitos mínimos exigidos en dormitorios por DB-HR de CTE.

El resto de los ensayos analizados se han realizado a solicitud de fabricantes, que abarcan datos desde 1999 hasta 2021, siendo un 63% de los mismos ensayados en tamaño normalizado.

Tabla 1. Datos analizados-Tipo de hojas, componentes y rangos de aislamiento.

Nº huecos	Superficie hueco (m ²)	Periodo	Tipo	Entrada de aire	Ubicación aireador
286	1 a 8,2	1999-2023	Practicables*, correderas, con o sin hojas fijas	Aireador higrorregulable*, otros	En cajón*, en perfilera

*La mayoría

Rango de resultados de aislamiento acústico, RA,atr				
		Nº huecos	Superficie hueco (m ²)	RA,atr
Practicables, 1 a 4 hojas, con o sin hojas fijas	Sin cajón, sin aireador	95	1 a 8,2	28-45 dBA
	Sin cajón, con aireador	1	2,9	27 dBA
	Con cajón, sin aireador	136	1,3 a 5,5	26-42 dBA
	Con cajón, con aireador	41	1,6 a 4,4	24-40 dBA
Correderas, correderas elevables, 1 ó 2 hojas con o sin hojas fijas	Sin cajón, sin aireador	5	1,2 a 1,8	21-34 dBA
	Sin cajón, con aireador	0	---	---
	Con cajón, sin aireador	6	1,8 a 6,7	26-35 dBA
	Con cajón, con aireador	2	7,7 a 8,1	36 dBA

Algunos de estos datos están publicados en la base de datos de acceso gratuito dBMat-Índices globales [12], publicada por el Área Acústica del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco.

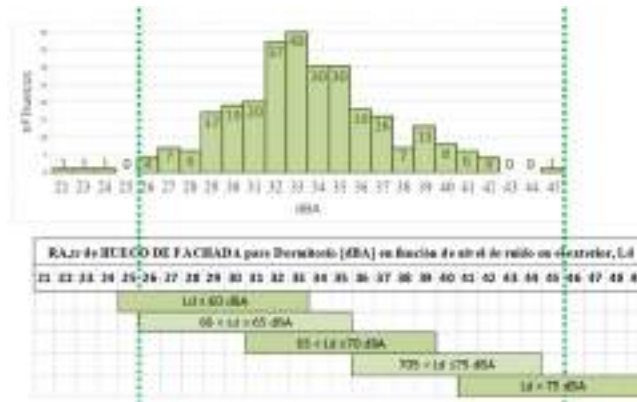


Gráfico 3. Distribución de $R_{A,atr}$ de las 286 composiciones de huecos de fachada. Comparación frente a requisitos mínimos exigidos en dormitorios por DB-HR de CTE.

Un amplio rango de valores de huecos de fachada cumple las especificaciones requeridas para niveles de ruido exterior Ld de hasta 65-70 dBA. Hay casos que incluso pueden alcanzar los requisitos solicitados para Ld (70-75) dBA. De ellas, 6 son de hojas practicables, con cajón de persiana y 1 con aireador.

3. EVOLUCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1. Ventanas con cajón de persiana

Se presentan los datos de 183 soluciones una gran variedad de huecos de fachada ensayados, que incorporan el cajón de persiana y que se han ensayado desde 2011. Los cajones son a su vez variados en cuanto a tipología y en cuanto al material en su interior, pudiendo estar vacíos o alojar EPS, láminas de alta densidad, combinación de ambos, etc.

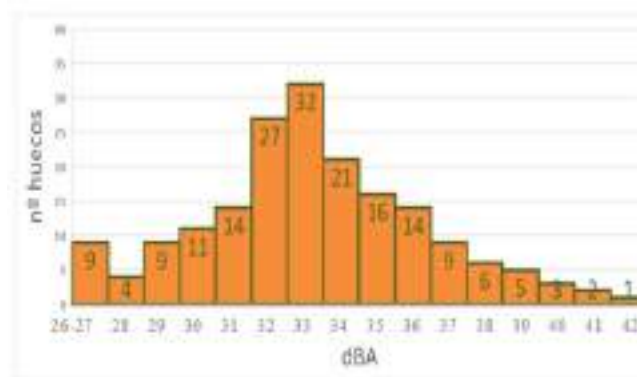


Gráfico 4. Ventana con cajón de persiana. Distribución aislamiento $R_{A,atr}$.

El rango de aislamiento acústico $R_{A,atr}$ alcanzado varía entre los 26 a 42 dBA, los resultados se centran en torno a 32-34 dBA, estando el 92% de casos entre 28 y 39 dBA.

3.2. Efecto de posición del paño de persiana subido o bajado

Se han analizado los resultados de 174 ventanas con cajón de persiana con el paño subido y bajado.

Tabla 2. Ventanas con cajón de persiana y paño de persiana subido y bajado analizadas.

Nº huecos	Superficie hueco (m ²)	Período	Tipo	Rango- R _{A,tr}	
				Persiana subida	Persiana bajada
174	1,3 - 8,1	2011-2023	Practicables*, correderas, con o sin hojas fijas. Cajón de persiana monoblock. 24% con aireador. *La mayoría	26-42 dBA 5 correderas 32-36 dBA	24-42 dBA 5 correderas 30-36 dBA

Cuando el paño de persiana se extiende, el aislamiento acústico global $R_{A,tr}$ del hueco, experimenta un empeoramiento en el 50 % de los casos, no se ve afectado en el 32 % y mejora en el resto de los casos. Los resultados de persiana bajada afectan en un rango de -7 a +3 dBA, centrándose un alto porcentaje entre -1 y 0 dBA.

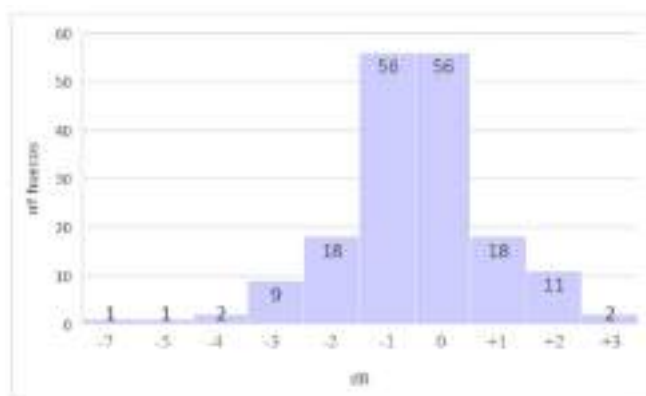


Gráfico 5. Efecto en la bajada de persiana en el aislamiento acústico frente al ruido de tráfico rodado $R_{A,tr}$ del hueco.

Este análisis complementa al estudio previo [13] realizado sobre ventanas con cajón de persiana de tamaño normalizado de 1,82 m² (1,23 m ancho x 1,48 m alto). Se han analizado un número y tipología de ventanas con cajón de persiana más amplio, utilizadas en viviendas: rango de anchura de 0,9 a 3,3 m y de altura entre 1 y 2,5 m alto, con o sin aireador, y diferentes configuraciones de perfilerías, vidrios, cajones, etc.

En las ventanas con cajón de persiana que disponen de aireador, 41 en total, la bajada de persiana produce una variación del aislamiento entre -2 a +2 dBA, estando siendo -1 a +1 dBA en el 85% de los casos. En el 44% empeora, 32% no afecta y 24% mejora la prestación.

3.3. Huecos de fachada con aireador

El rango de aislamiento de los 44 huecos de fachada de control de obra que incorporan aireador ensayados en el periodo 2010-2023 está entre 24 y 40 dBA. Todos los valores excepto uno, son de huecos de control de obra.

Tabla 3. Huecos de fachada con aireador analizados y rango de aislamiento

Nº huecos	Superficie hueco (m ²)	Período	Tipo	Entrada de aire	Ubicación aireador
44	1,6 a 8,1	2010-2023	Practicables*, correderas, con o sin hojas fijas	Aireador higrorregulable*, otros	En cajón*, en perfilería
*La mayoría					
Rango resultados aislamiento acústico, R _{A,tr}					
43 con persiana subida		41 con persiana bajada		1 sin cajón	Efecto bajar persiana
24 - 40 dBA		27 - 39 dBA		27 dBA	-2 a +2 dBA

El 58% de los huecos de fachada presentan rango de aislamiento $R_{A,tr}$ entre 32 y 35 dBA. El 98% de casos, todos menos uno, dispone de un aislamiento $R_{A,tr}$ entre 26 y 40 dBA.

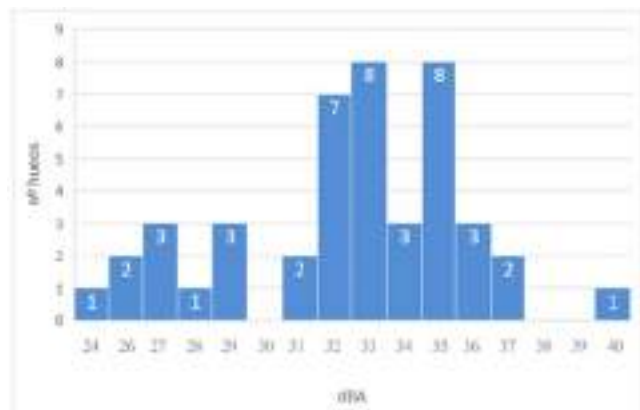


Gráfico 6. Distribución de los resultados $R_{A,tr}$ de 44 huecos de fachada, que integran sistema de admisión de aire.

Se ha analizado una misma ventana con cajón de persiana, con aireador en perfilería, con el mismo aireador en el cajón y con un aireador diferente en el cajón. Los resultados son de 26, 27 y 29 dBA respectivamente. También se incluye otra ventana con cambio de tipo de aireador en el cajón, que pasa de 36 a 37 dBA.

El valor mínimo de 26 dBA supera el requisito mínimo de 25 dBA recogido en la Tabla 1, aplicable cuando el % hueco de la fachada no supera el 15% de la superficie y la parte ciega tiene un aislamiento $R_{A,tr} \geq 55$ dBA. La ventana con cajón de persiana de mayor aislamiento, 40 dBA, da cumplimiento al requisito in situ mínimo de $D_{2m,nT,A,tr} \geq 42$

dBa, que implica una ventana de $R_{A,tr} \geq 40$ dBa para un % de hueco en la fachada entre 16 y 30% y una fachada ciega aislamiento m de superficie ciega mínimo de 50 dBa.

3.4. Aislamiento del hueco de fachada: $R_{A,tr}$ VS R_A

Se ha centrado el análisis del aislamiento acústico en el parámetro $R_{A,tr}$. En ocasiones puede ser necesario disponer del valor de índice $R_A = R_W + C_{tr}$ [10]

Se presentan los rangos de empeoramiento del valor $R_{A,tr}$ y R_A , basado en el aislamiento de 460 de huecos de fachada.

Tabla 4. Valor aislamiento global de huecos de fachada. Diferencia entre $R_{A,tr}$ y R_A .

Superficie hueco (m2)	Período	Tipo	DIFERENCIA DE ÍNDICES GLOBALES: $R_{A,tr} - R_A$ [dBa]		
1,0 a 8,2	1999-2023	Practicables*, correderas, con o sin hojas fijas * La mayoría	103 ventanas sin cajón de persiana	183 ventanas con persiana subida	174 ventanas con persiana bajada
			-6 a 0 dBa -4 a -2 dBa [89%]	-5 a -1 dBa -3 a -2 dBa [80%]	-7 a -2 dBa -5 a -4 dBa [86%]

Para todos los datos analizados, excepto uno, el parámetro $R_{A,tr}$ es inferior al R_A . El rango de empeoramiento está comprendido entre -1 y -7 dBa, estando el 97% entre -5 y -1 dBa y el 63% entre -4 y -3 dBa. Para ventanas sin cajón de persiana y con cajón con persiana subida, un alto porcentaje se centra en una diferencia de -4 a -2 dBa. Para los datos de persiana bajada, la diferencia es mayor, entre -5 y -4 dBa.

4. CONCLUSIONES

Los datos de ventanas con cajón de persiana pueden alcanzar valores de aislamiento similares a los de sin cajón de persiana. Para ello, será necesario atender a las prestaciones de todos los componentes del hueco, tanto del vidrio, como del cajón de persiana, aireador,...

En cuanto a la influencia de bajar el paño de persiana en el aislamiento global $R_{A,tr}$ del hueco de fachada: A tenor de los resultados, puede extraerse que en un 50% de casos el resultado con persiana bajada disminuye entre -1 y -3 dBa respecto a la situación con persiana subida.

El CTE establece exigencias tanto de protección contra el ruido como de calidad de aire interior, para asegurar un confort mínimo del usuario de la vivienda. Los sistemas de aireación son necesarios para conseguir una calidad de aire adecuada; sin embargo, la colocación de sistemas de admisión en fachada puede perjudicar al aislamiento acústico de la misma. El aislamiento acústico mínimo de un hueco de fachada a colocar en obra dependerá del nivel de ruido en el exterior, del % que ocupa el hueco de fachada y del aislamiento de la superficie ciega de fachada. El aislamiento de los huecos de fachada con aireador analizados está comprendido entre 24 a 40 dBa ($R_{A,tr}$) por lo que puede

concluirse que existen ventanas con aireador incorporado, la mayoría de tipo higrorregulable y ubicado en el cajón de persiana, que pueden cumplir un amplio rango de los requisitos establecidos por el DB-HR del CTE.

A tenor de los resultados de ensayo analizados, se puede concluir que a pesar de la incorporación de nuevos elementos críticos para el aislamiento acústico de hueco de fachada, y parámetros de valoración más exigentes, se han desarrollado soluciones que satisfacen un amplio rango de requerimientos del DB-HR del CTE. Así mismo hay datos de ventanas con cajón de persiana, incluso con aireador, que satisfacen requerimientos elevados.

Un control de obra en el que se verifique el aislamiento del conjunto ventana, ha ayudado a detectar y mejorar posibles deficiencias previo a su colocación, y en general ayuda a garantizar un resultado in situ de aislamiento frente al ruido exterior acorde con los requisitos de proyecto.

5. REFERENCIAS

- [1] Documento Básico DB-HR Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 1371/2007, 19 de octubre.
- [2] UNE-EN 14351-1:2006+A2:2017. Ventanas y puertas. Norma de producto, características de prestación. Parte 1: Ventanas y puertas exteriores peatonales.
- [3] Reglamento (UE) No 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011.
- [4] UNE-EN ISO 10140-1:2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 1: Reglas de aplicación para productos específicos. (ISO 10140-1:2010).
- [5] Guía de aplicación del DB-HR Protección frente al ruido. V.03 Diciembre de 2016. Tabla 2.1.4.23.
- [6] Documento Básico DB-HS Salubridad del Código Técnico de la Edificación.
- [7] UNE-EN ISO 140-3:1995. Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción (ISO 140-3:1995).
- [8] UNE-EN ISO 10140-2:2022. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo. (ISO 10140-2:2021).

[9] UNE-EN ISO 12354-1:2018: Acústica de edificios. Estimación del rendimiento acústico de los edificios a partir del rendimiento de los elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos. (ISO 12354-1:2017).

[10] UNE-EN ISO 717-1:2021. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. (ISO 717-1:2020).

[11] Orden de 15 de junio de 2016, del Consejero de Empleo y Políticas Sociales, sobre Control Acústico de la Edificación.

[12] Base de datos dBMat-Índices globales. <http://acoubat-dbmat.com/base-de-datos-dbmat-2-2-2-2/>

[13] A. Javier López, María José De Rozas and Susana Lopez de Aretxaga. “Ventana y cajón de persiana: estudio del comportamiento acústico en diferentes situaciones”, in 41º Congreso Español de Acústica. 6º Congreso Ibérico de Acústica. TECNIACÚSTICA 2010, (León, Spain).

DISEÑO DE CUBIERTAS METÁLICAS EN RECINTOS DEPORTIVOS

Alexander Díaz-Chyla^{1*}

¹ Grupo de investigación de Acústica Arquitectónica E.T.S. de Arquitectura UPM, Madrid.

RESUMEN

Uno de los mayores condicionantes para seleccionar el sistema constructivo de la cubierta de los recintos deportivos son sus prestaciones de aislamiento acústico, especialmente en bajas frecuencias. Este trabajo muestra el proceso de diseño, la evolución histórica de los recintos deportivos cubiertos y las soluciones constructivas habituales de cubiertas metálicas según la actividad desarrollada, para así alcanzar los niveles de aislamiento requeridos.

ABSTRACT

One of the main constraints for selecting the construction system for the roof of arenas is its acoustic noise insulation performance, especially at low frequencies. This work shows the design process, the evolution of enclosed sports venues and the usual construction solutions for metal roofs according to the activity carried out to achieve noise insulation criteria.

Palabras Clave— recintos deportivos, acústica de recintos, cubiertas metálicas

1. INTRODUCCIÓN

Los usos y espectáculos que se dan en los recintos deportivos de grandes dimensiones han aumentado en las últimas décadas. Las nuevas actividades que se realizan ya no se centran exclusivamente en el ámbito deportivo. Ahora encontramos actividades como conciertos, exposiciones, ferias, congresos, actos religiosos, etc. que han derivado en una especialización y tecnificación de soluciones para obtener una adecuada acústica para cada uso en el mismo espacio compacto. El diseño de la envolvente, principalmente la cubierta, tiene un gran impacto en la experiencia del usuario dentro del recinto, desde el comportamiento de los espectadores / aficionados, la influencia en el rendimiento de los jugadores a la selección del sistema de audio o sistemas de evacuación idóneos.

La selección de los sistemas constructivos y materialidad desde las fases tempranas tendrá repercusión en el resultado

final del diseño, especialmente para alcanzar los objetivos de aislamiento a ruido aéreo y acondicionamiento acústico. La variedad de eventos que se realizan en los recintos deportivos ha derivado en una situación en donde un diseño acústico, en coordinación con otras especialidades como diseño estructural o seguridad ante incendio, se hace imprescindible.

2. EVOLUCIÓN DE LA ACÚSTICA EN RECINTOS DEPORTIVOS

Los primeros recintos deportivos multiusos, con cubierta cerrada aparecieron en Estados Unidos (1) con un uso casi exclusivo de baloncesto y hockey sobre hielo. Estos recintos tenían un foco de diseño en la visión del deporte, el apoyo visual del mismo (marcadores, nombres de jugadores) y en resolver las necesidades estructurales y de climatización de estos. Con la evolución de la música de masas, debido a la capacidad de albergar a gran cantidad de espectadores, los recintos deportivos se fueron usando para fines musicales. Estos primeros recintos resultaron en un diseño acústico complicado, con altavoces colocados en el suelo del escenario al no estar la estructura pensada para tal cometido, grandes volúmenes y con todos los acabados reflectantes. Generalmente la percepción acústica del usuario era pobre, con problemas de ecos y tiempos de reverberación excesivamente altos.



Figura 1. Hinkle Fieldhouse, Indiana.

* **Autor de contacto:** alexander.diaz@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Con la evolución del mercado musical y de la industria del entretenimiento surgida en la década de los 90 y la aparición de las normativas acústicas y de concienciación social, los operadores, propietarios de los recintos y legisladores generaron un cambio en el proceso de diseño para resolver los problemas acústicos. Estos cambios se centraron en el aislamiento acústico, acondicionamiento del espacio principal / bowl e integración estructural de los sistemas de megafonía.

En la actualidad, los nuevos diseños de recintos deportivos requieren de un diseño acústico muy cuidado para potenciar y enriquecer la experiencia del usuario, pero alcanzando los requisitos normativos para evitar molestias a su entorno inmediato. Los requisitos acústicos deben de estar presentes desde las primeras conversaciones del diseño y la figura del consultor acústico presente en el equipo multidisciplinar debido al impacto en aspectos estructurales y en el diseño de la cubierta. Diseñar inadecuadamente una cubierta supone un sobre coste ingente o imposible de rectificar por sus implicaciones estructurales.

2.1. Niveles de presión sonora previsible

El primer concierto de rock en un recinto deportivo data de 1965, cuando los Beatles actuaron en el estadio Shea de Nueva York ante 55.000 personas (2). Los periódicos trataron el concierto como una curiosa aberración. El New York Times se refirió a los fans que gritaban, que producían una "voz magnífica y aterradora". El concierto del Shea Stadium de los Beatles se considera el comienzo de la música en recintos deportivos.



Figura 2. Concierto de Los Beatles en el Shea Stadium, NYC.

Cada vez son más los espectadores que se demandan acudir a los distintos eventos deportivos, experimentando así una fuerte afinidad al animar juntos a sus jugadores favoritos (3). El ruido del público desempeña un papel importante en la ventaja de jugar en casa (4) y crea un efecto de comunidad acústica entre los aficionados del mismo equipo. Los equipos locales tienen además la capacidad de manipular los niveles de sonido a través de la participación de los aficionados e incluso empleado los equipos de sonido y los altavoces del recinto para su beneficio (gradas de animación).

Lo mismo sucede con los eventos musicales, donde en las últimas décadas se ha aumentado la capacidad de los asistentes del estadio (sobre todo al utilizar el terreno de juego como zona de escucha), y pudiendo colocar los sistemas de audio en diferentes posiciones (centro de la pista, en los fondos o utilizando parcialmente los del recinto deportivo) produciéndose distintos niveles de potencia acústica dentro de un mismo recinto.

La atenuación de estos niveles y el aislamiento a las áreas adyacentes son uno de los principales factores en la selección de los sistemas constructivos de cubierta. A continuación, se muestran distintos niveles de ruido medido in situ en los límites de los recintos (cubiertas y fachadas) como referencia de los niveles esperados.

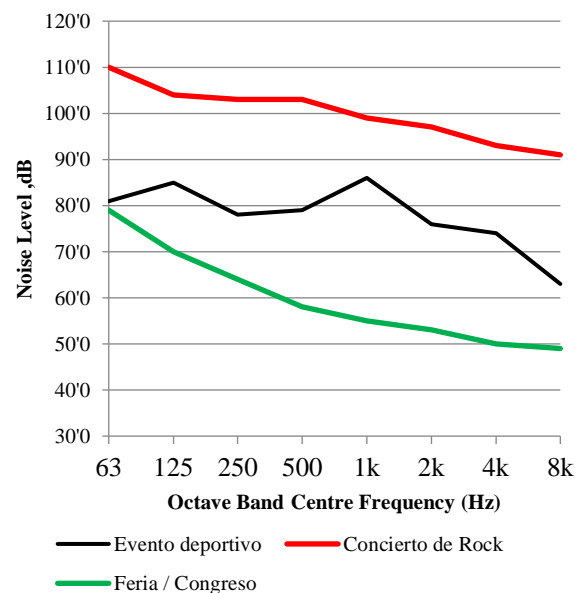


Figura 3. Niveles de presión sonora medidas en los límites de los recintos

3. TIPOS DE CUBIERTA COMUNMENTE EMPLEADAS

La funcionalidad, la eficiencia y la sostenibilidad desempeñan un papel fundamental en todas las instalaciones deportivas modernas (6). Los usos diversos y flexibles del recinto deben conducir a una rentabilidad económica, optimización de recursos y potenciación de la experiencia del usuario. Los equipos de diseño suelen emplear un material que les ofrezca versatilidad. Generalmente, partiendo de un producto básico como los paneles de aluminio con aislamiento adherido, se pueden crear sistemas compuestos y combinaciones para dar respuesta a los requisitos de aislamiento acústico que se generen en el recinto.

Dentro de los sistemas de cubierta generalmente empleados en recintos deportivos, se ha procedido a catalogar 3 sistemas

habituales. A continuación, se procede a realizar una rápida descripción constructiva acompañada de ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo obtenidos en cámaras de laboratorio de algunos de los sistemas de la casa comercial Kalzip:

3.1. Sistema básico

Compuesto por una bandeja de aluminio y aislamiento acústico sobre un elemento resistente (generalmente chapa grecada) apoyada sobre una subestructura. Existe la posibilidad de incluir paneles cementicios o de base de yeso laminado para aumentar la masa del sistema.

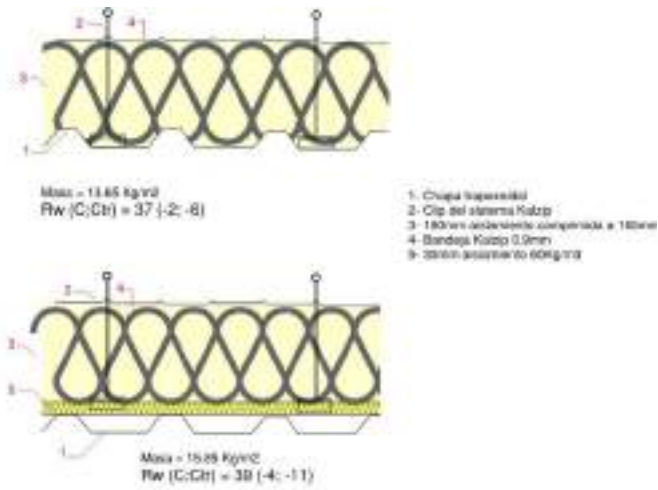


Figura 4. Descripción sistemas básico Kalzip 3057

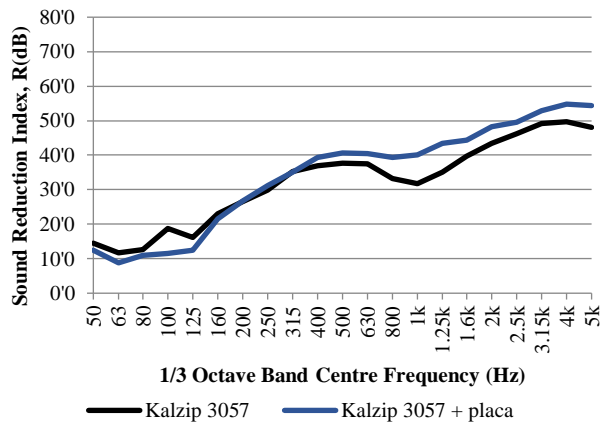


Figura 5. Niveles de aislamiento a ruido aéreo medido en laboratorio Kalzip 3057

3.2. Sistema compuesto

Partiendo del sistema básico, se incluyen distintas capas de aislamiento con diferentes densidades y espesores. Igualmente, se pueden incluir elementos de mayor masa como placas de yeso o placas cementicias si la estructura lo permite.

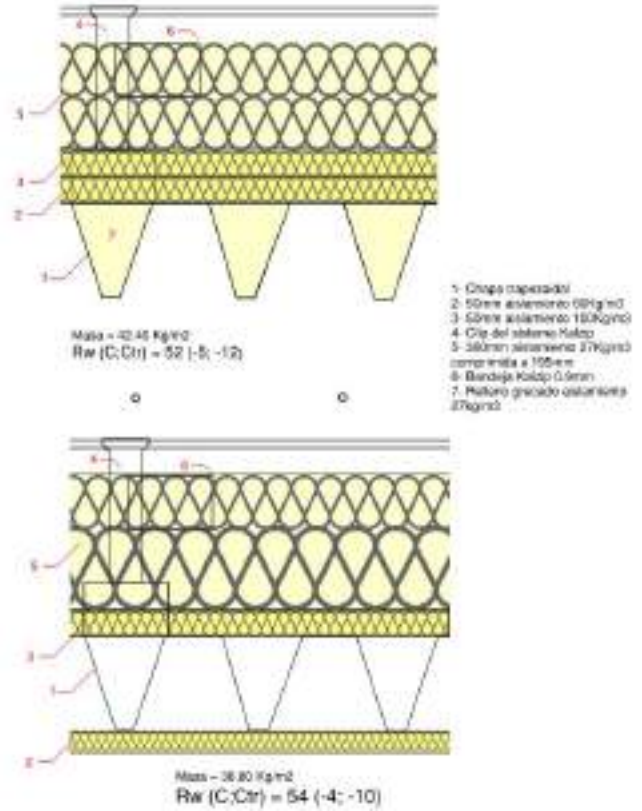


Figura 6. Descripción sistemas básico Kalzip 3SRL-RP.

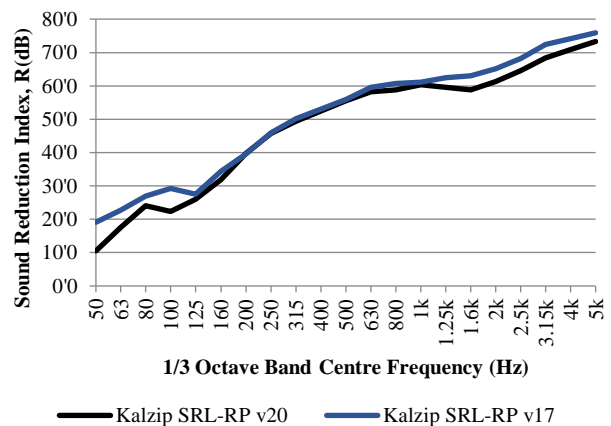


Figura 7. Niveles de aislamiento a ruido aéreo medido en laboratorio Kalzip SRL.

3.3. Sistemas dobles

Partiendo de un sistema básico, se incluyen elementos con cierta masa (placas cementicias y/o placas de yeso laminado) y un sistema de falso techo con una cavidad (generalmente >300mm).

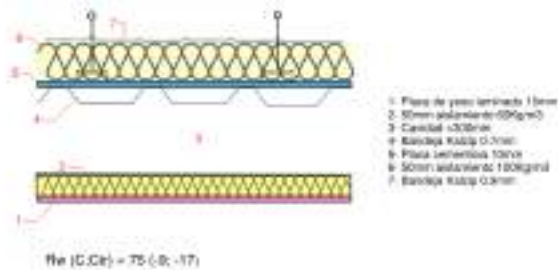


Figura 8. Descripción sistemas doble Kalzip.

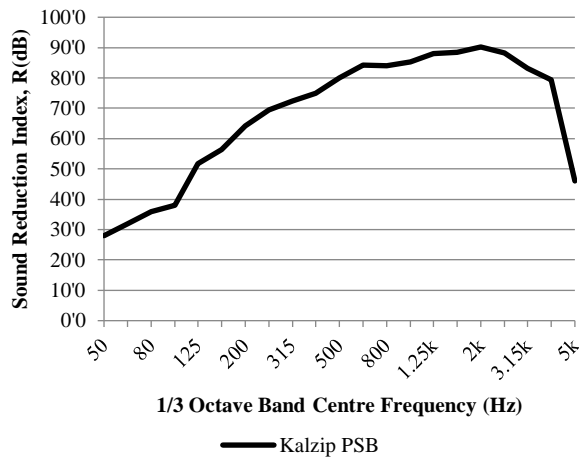


Figura 9. Niveles de aislamiento a ruido aéreo medido en laboratorio Kalzip PSB.

4. CONCLUSIONES

El diseño de las cubiertas de recintos deportivos ha ido evolucionando en paralelo al uso previsto de los recintos, los requisitos técnicos (acústicos, térmicos, etc.) y normativos, así como de los sistemas estructurales. Actualmente en un recinto deportivo se plantean multitud de actividades, buscando un uso constante del espacio para maximizar ingresos percibidos.

La correcta selección en fases iniciales de las prestaciones técnicas de la cubierta, especialmente de sus propiedades acústicas, se hace cada vez más relevante para evitar modificaciones en el diseño con un gran impacto en costes, pesos y geometría.

El mercado presenta sistemas de cubierta que se adaptan y configuran en función de las actividades a desarrollar en el interior del recinto. Cuando esta actividad incluye el uso de sistemas de audio o conciertos de música en vivo con equipos externos, el aislamiento en bajas frecuencias se convierte en uno de los principales problemas de conflicto. Como se presenta a continuación, para atenuar en bajas frecuencias, se hace necesario incluir sistemas de cubierta dobles y compuestos, empleando paneles prefabricados (cementicios, yeso laminado) para alcanzar masas por encima de 150Kg/m²

5. REFERENCIAS

- [1] Patel, R, "Architectural acoustics, A guide to integrated thinking" Journal, RIBA, UK, 2020.
- [2] Umberger, D, *Stadium concerts*, Encyclopedia.com
- [3] Donguk, L.; Woojae H, "Noise & Health" volume 21, 2019.
- [4] Asprey, W; Dulle, D; Chabra, A., *Get loud, go deaf? Noise levels in arenas can cause harm*, Mayo Clinic, 2018
- [5] Morris, G; Atieh, B; J.Keller, R, "Noise exposures. Assessing an NCAA Basketball Arena on Game Day" Public Safe ASSP Foundation, 2013.
- [6] Kalzip GmbH, Kalzip Systems- Products and applications, 2020



MEDICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO EN CONDICIONES COMPARABLES DE LABORATORIO DE VENTANAS DE DISEÑO TRADICIONAL Y VENTANAS DE ESTRUCTURA METAMATERIAL

Dulce Rosario Ponce Patrón^a, Felipe Orduña Bustamante^b, Guillermo Quintero Pérez^b, Santiago Jesús Pérez Ruiz^b, Ricardo Dorantes Escamilla^b, Antonio Bautista Kuri^a, Antonio Pérez López^b.

^a Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

^b Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
Universidad Nacional Autónoma de México.

RESUMEN

Las fachadas de los edificios tienen la función de controlar los factores ambientales externos; entre ellos el ruido. Su composición formal debería presentar una respuesta tecnológica ante las diversas condiciones de su entorno, como el desempeño óptimo de reducción acústica; que corresponda con el uso del edificio y el nivel sonoro al que están expuestas. Es común que, en el diseño de las soluciones acústicas, la fachada se asuma 'sellada' debido a dichos requerimientos; sin embargo, no siempre es así ya en funcionamiento. En los edificios de vivienda vertical en la Ciudad de México las fachadas utilizan cerramientos de ventana; y es común el uso de ventilación natural, y que sus dimensiones respondan a necesidades higiénicas de iluminación y ventilación.

Este estudio considera las implicaciones que presenta proyectar un vano con ventilación de diseño tradicional, en el confort acústico de una edificación de vivienda vertical. Posteriormente, explora otras opciones de protección pasiva que permiten la ventilación y reducción acústica mejorada con base en los metamateriales. Finalmente, en laboratorio mediante la norma ISO 10140 se analiza y se compara la protección que ofrecen las diferentes tipologías de materiales en cerramiento y el área de ventilación: ventana pivotante de aluminio y vidrio (abierto y sellado), ventana con estructura de metamaterial.

ABSTRACT

In Mexico City, urban mobility produces noise pollution, which affects the inhabitants. Building facades can help in controlling external environmental factors, including noise. Their formal composition must present an adequate technological response to the environment, particularly an optimal performance of acoustic reduction, in correspondence with the intended use of the building and the

sound level to which it will be exposed. It is common that, in acoustic solutions, the facade is assumed to be 'sealed' in compliance with such requirements. However, this is not always the case in operation. In vertical housing buildings in Mexico City, the window enclosure span is used as a design parameter, with dimensions responding to the minimum hygienic needs of illumination and ventilation. This study considers the implications of designing a traditional ventilated opening for the acoustic comfort of a vertical housing building. Subsequently, other passive protection options that allow ventilation and improved acoustic reduction based on metamaterials are explored. Finally, the protection offered by different types of enclosure materials and the ventilation area that they offer are analyzed and compared: pivoting window with aluminum frame and glass (open and sealed) and a metamaterial based window 1.

Palabras Clave— aislamiento acústico, ventilación natural, metamaterial

1. INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México la movilidad urbana produce contaminación acústica que pone en riesgo la salud y calidad de vida de los habitantes. El resultado de estas condiciones son entornos urbanos poco favorables con elevados niveles sonoros, del tal modo que es de suma importancia incorporar en las fachadas expuestas (a esos ruidos que se transmiten por vía aérea), sistemas que controlen la transmisión de energía acústica y se alcancen los objetivos de calidad acústica adecuados al interior de los edificios. No siempre es posible para los diseñadores modificar el nivel sonoro al exterior del edificio, pero sí pueden controlar la inmisión y obtener un nivel sonoro idóneo en los espacios habitables, eligiendo soluciones de diseño y tecnológicas, activas o pasivas, con adecuadas propiedades de reducción acústica [1].

En la actualidad, los altos consumos y costos energéticos han demandado envolventes que reduzcan la demanda de calefacción o enfriamiento y entre otras estrategias, el uso de la ventilación natural [2][3][4] es deseable y habitual en las construcciones de la Ciudad de México; incluso se considera de manera obligatoria en normativas de construcción y vivienda [5][6]. Un local debe estar iluminado por un área de ventana igual o superior a 17.5% del área del local, y el 5% destinado para ventilación.

Sin embargo, en el diseño de fachadas de los edificios o particiones interiores, rara vez se considera el control acústico. Por ejemplo, el Código de edificación de vivienda [6] de la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) considera que se deben generar las condiciones para que “el conjunto de los elementos constructivos... permitan cumplir los tiempos máximos de exposición por nivel de presión sonora” y establece el peso mínimo de la envolvente será de 250 kg/m² o el Reglamento de construcción [5] que establece que la reducción acústica de la envolvente debe ser igual o mayor a 30 dB. En el primer caso, lo establecido funciona como una sugerencia y en el segundo caso, aunque es parte de los requisitos para un permiso de construcción, en la práctica no es obligatoria.

Es necesario considerar, además, que las edificaciones que priorizan la ventilación natural disminuirán significativamente la reducción sonora de una partición [7][8]. Una estrategia adecuada para el aislamiento acústico inicialmente sugiere el uso de muros de espesor considerable, la combinación de sistemas constructivos con varias capas de materiales o la implementación de materiales y sistemas aislantes acústicamente. No obstante, habrá que considerar que los requerimientos higienistas de ventilación e iluminación usualmente conllevan el uso de aperturas en la fachada y cuando ésta cuenta con elementos de vanos como ventanas o puertas, éstas debilitan la ‘protección’ sonora que ofrece el sistema. Es común que en las soluciones acústicas la fachada aún con ventanas o puertas se asuma ‘sellada’ [8], sin embargo, no siempre es así ya en funcionamiento, como en el caso de la Ciudad de México.

De acuerdo con lo antes expuesto, es pertinente evaluar otras alternativas en el diseño de sistemas de envolventes que permitan de manera pasiva la inmisión del viento y a su vez controlen la inmisión sonora. El objetivo de esta comunicación es determinar el tipo de ventana que presenta la mayor eficiencia en relación con la reducción acústica y el área de ventilación ofrecida. Para ello se seleccionaron dos ventanas (ventana pivotante de aluminio y vidrio, y otra a base de estructura de metamaterial) y mediante pruebas de laboratorio siguiendo la norma ISO 10140 [10][11] se calcularon sus índices de reducción acústica (R_w). Posteriormente se compararon los valores de R_w obtenidos y los valores de área de ventilación ofrecida para cada caso.

2. AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE FACHADAS

El papel de la fachada es reducir la transmisión de sonido hacia el recinto interior, para garantizar que el nivel de inmisión del ruido sea adecuado y los habitantes desarrollen sus actividades satisfactoriamente. Habrá que tener en cuenta que el aislamiento acústico es un enfoque de sistema, es decir se deben considerar la acción conjunta de los elementos vanos, macizos y elementos de unión, para obtener un mejor acercamiento.

Si se busca una estrategia adecuada para el aislamiento acústico se considera el uso de elementos (muros, ventanas, puertas) que reduzcan la transmisión de la energía sonora; cuyo desempeño se mide en el sitio, mediante la diferencia de nivel normalizada de la fachada a 2 m (D_{tr2,mn}) y evaluada de acuerdo con las normas ISO 16283-3[12] e ISO 717-1[11], o conociendo el índice de reducción acústica (R o R_w) del material, medido en laboratorio para cada banda del espectro de frecuencias a partir de la norma ISO 10140 [10] u obtener un valor global (R_w) y términos de adaptación espectral C y C_{tr}, que condicionan el desempeño global de la partición ante ruido comunitario (C) o ruido por tráfico vehicular (C_{tr}), calculados a partir de la norma ISO 717-1[11] y se evalúa el rendimiento acústico de los edificios a partir de la norma ISO 12354-3:2017 [13].

El índice R mide el decremento normalizado del nivel sonoro debido a la presencia de un elemento constructivo que impide la libre transmisión del sonido y se determina mediante la expresión:

$$R_i = L_1 - L_2 + 10 \frac{S}{A} \quad \text{dB} \quad (1)$$

$$A = 0.16 * \frac{vr}{Tm} \quad \text{m}^2 \quad (2)$$

$$R_i = -10(10^{-R_i*0.1} - 10^{-R'_F*0.1}) \quad \text{dB} \quad (3)$$

Donde: R_i es la diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencias i; L₁ es el nivel de presión sonora medido en la cámara emisora; L₂ es el nivel de presión sonora medido en la cámara receptora; S es el área de la partición analizada.

A es el área de absorción equivalente en el cuarto receptor, y para su cálculo se toma el tiempo de reverberación promedio T_m y volumen (vr) en el cuarto receptor. Al colocarse un elemento de menor tamaño el valor R será comparado con un valor de referencia R’F que corresponde al valor de R del muro y se aplica la expresión (3), si las diferencias son mayores a 6 dB se genera una corrección por flanqueo (transmisión por rutas alternas, estructurales, etc.).

También es necesario identificar el tipo de sonido que se va a reducir y sus características de intensidad acústica (dB) y espectro de frecuencias, por ejemplo, el espectro de frecuencias principal del ruido de tráfico vehicular se encuentra en el intervalo de 500 a 4000 Hz [18] y aunque de acuerdo con la intensidad del sonido y el valor global R_w una partición pudiera cumplir con los requerimientos, si se observa el espectro de frecuencias, usualmente las barreras comunes no son efectivas en bajas frecuencias como 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz “debido a la gran masa superficial requerida por la ley de densidad de masa” [14] para dichas frecuencias.

3. EL VANO DE LA FACHADA

Una abertura en la fachada representa una vulnerabilidad desde el punto de vista acústico. Constructivamente, si a un muro se le coloca una ventana, esta será el elemento vulnerable para la transmisión del ruido. Esto es debido a que en una ventana el 80% es vidrio de bajo espesor (poca masa por unidad de área), sujetado por un marco (aluminio, hierro, madera o PVC), usualmente ambos con valores bajos de reducción sonora (R). También es pertinente considerar que, en la colocación, un sello no adecuado propicia vacíos o aperturas cuyo índice de reducción sonora se considera nulo.

El desempeño acústico de un sistema de ventana dependerá de: el tipo de vidrio y espesor, tipo de marco y sello tanto en juntas como en el sistema de apertura de la ventana [12], es decir elementos de mayor solidez o masa presentarán mejores desempeños, así como el control de la transmisión a partir de elementos de sellado. En un sistema cerrado como un muro cortina o una ventana, el uso de varias capas y cámara de aire [1] [14] [15] proveen mejores propiedades de aislamiento acústico que los vidrios sencillos. Sin embargo, la mayor condición que afecta su capacidad son los huecos en el sistema de cierre; las ventanas corredizas son las de menor desempeño y las ventanas con batiente (con sistemas de sello adecuado) permiten mayor estanqueidad y por lo tanto mejor desempeño acústico [16].

La dimensión del vano también influye en el desempeño, de acuerdo con Díaz [16] si las dimensiones de la ventana ensayada en laboratorio superan los 2.7 m² por cada 1 m² adicional, el valor global R_w de la ventana disminuirá 1 dB.

3.1. Vanos con ventilación natural

En edificaciones residenciales es deseable permitir el acceso de aire del exterior al interior de los recintos para que este renueve el aire del interior y lo renueve constantemente, con ello se satisfacen los requerimientos higienistas de renovación del aire y garantiza su calidad. Otro fin es la climatización enfocada en el enfriamiento (ya sea del

individuo, el recinto o la estructura del edificio) [15]; el intercambio de aire entre espacios por medio de vanos se origina porque el viento genera diferenciales de presiones y de temperatura (convección).

Para que estas condiciones se generen exitosamente es necesario que el recinto presente dos aberturas, una en presión positiva del viento (barlovento) y la otra en presión negativa (sotavento) y sus dimensiones están condicionadas por el flujo del viento y un factor de relación (f_r). De acuerdo con ASHRAE [17] la tasa de ventilación se obtiene mediante la ecuación (4)

$$Q = C_v A_e v \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Donde: Q es la tasa de ventilación, A_e es el área libre del vano o abertura de acceso del viento (m²), v es la velocidad del viento (m/s) y C_v es la efectividad de acceso del viento proporcionada por el vano; el viento con incidencia perpendicular tiene mayor efectividad, presenta valores de incidencia 0.5 y 0.6, y el acceso en diagonal presenta valores de incidencia de 0.25 a 0.35.

Si se busca utilizar la ventilación natural como estrategia de enfriamiento, los edificios deberán privilegiar la orientación de la fachada hacia la zona de barlovento, y si la posición del terreno no lo permite, estas fachadas tenderán a requerir aberturas de mayor tamaño y sin obstrucciones. Ahora bien, en estos casos el incremento en el área de ventilación es proporcional a mayor circulación de aire fresco, sin embargo, al disminuir la estanqueidad, la capacidad de mitigación del ruido disminuye [17].

De acuerdo con Locher et al. [18] una ventana abierta muestra un desempeño de reducción acústica global (R_w) de entre 10 a 13 dBA, para ventanas inclinadas como pivotantes o abatibles se muestra un desempeño de reducción acústica global (R_w) de entre 14 y 19 dBA, a diferencia de ventanas cerradas que muestran desempeños de reducción acústica global (R_w) de entre 26 y 31 dBA,

Se han desarrollado diversas técnicas de control para la mitigación del ruido en protuberancias de la fachada para el control de la inmisión de la ventana ventilada y de otros elementos aplicados directamente a la ventana, estas técnicas se dividen en control activo y pasivo.

Las técnicas del control pasivo se basan en la absorción de la energía acústica por medio de materiales absorbentes o modificando los patrones de transmisión de la onda sonora; como fachadas dobles [7][18][19], el uso de elementos absorbentes que disminuyen la reflexión en salientes [20] [21], ventanas *plenum* simples [23] (con entrada de aire y salidas escalonadas) o con arreglos de tubos [22], elementos resonadores de membrana en ventanas [12][24]. Las técnicas

activas generan sonido de manera controlada por medio de fuentes sonoras secundarias para reducir los niveles de sonido de algunas frecuencias del espectro.

5.1.1. Estructura de metaventana

Cuando una onda pasa a través de una estructura periódica suceden efectos en ella [25] como modificación en la transmisión de la onda, módulos de masa con valor efectivo negativo, densidad de masa efectiva negativa [14], valores efectivos negativos de índice de refracción, entre otros.

Las estructuras periódicas, se pueden diseñar con propósitos y composiciones específicas para aprovechar estos efectos. En ingeniería son conocidas como estructuras de metamateriales y han demostrado potencial para la mitigación del ruido de baja frecuencia, aunque actualmente sus implicaciones prácticas son limitadas debido a la complejidad de diseño y de fabricación (Figura 1).

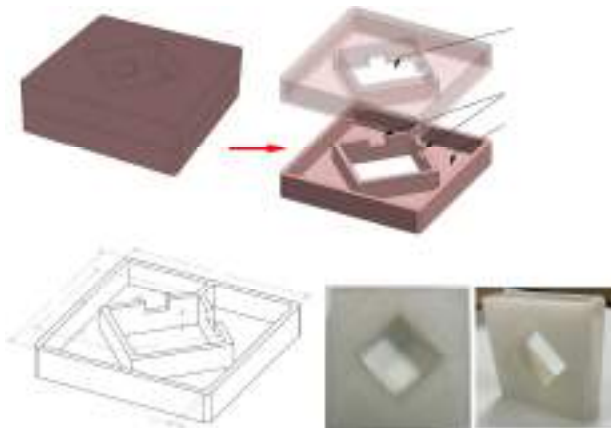


Figura 1. Configuración de celda de estructura de metamaterial fabricada con impresora 3D. Fuente: Kumar, Bang y Pueh (2019) [14].

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones se realizaron en la cámara de transmisión (CT) del Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) de la Universidad Nacional Autónoma de México, durante el periodo de febrero – mayo de 2023. Los equipos utilizados fueron: fuente omnidireccional y analizador B&K 2133, micrófonos de incidencia aleatoria B&K modelos 4943 y 4166, Boom giratorio B&K modelo 3923, calibrador 4230, termo higrómetro CT485R5 (White box). La cámara de transmisión del laboratorio tiene dos recintos: la cámara emisora (CE) (volumen 78.7 m³) y la cámara receptora (CR)

(volumen 67.7 m³), ambas fueron caracterizadas y adecuadas con el objetivo que los tiempos de reverberación (TR) cumplan con lo establecido en la norma ISO 10140-1[10].

Las propiedades de reducción acústica se midieron de acuerdo con las normas ISO 10140-2:2010 [09] [10] y las mediciones fueron evaluadas de acuerdo con la norma ISO 717-1 [11]. Entre las dos cámaras (CE y CR) se colocó un muro de block de concreto (M) de 10m² con aplanado de mortero en ambas caras, desacoplado de la estructura, procurando disminuir la transmisión por flancos de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 10140-2 [10]. Posteriormente, se determinó el nivel de presión sonora incidente promedio (L₁) y el nivel de presión sonora transmitida promedio (L₂) en 12 puntos de medición y dos posiciones de fuente; la temperatura osciló entre los 16° y 17° C y la humedad relativa entre el 61% y 63% en el periodo de medición.

Se calculó el área de absorción en CR a partir de la ecuación (3), después se calculó el indicador R a partir de la expresión (1) utilizando la superficie de la partición (S) de 10 m², los resultados se presentan en decibeles (dB) para el espectro de frecuencias en bandas de tercios de octava de 100 a 5000 Hz. Además, se calculó el valor global (R_w) para todas las bandas de frecuencia; para ello se utilizó el método de comparación contenido en la norma ISO 717-1 [11] y se obtuvieron valores de términos de adaptación espectral C y C_{tr}, que condicionan el desempeño global de la partición ante ruido comunitario (C) o ruido por tráfico vehicular (C_{tr}).

A continuación, se abrió un vano en el centro del muro de 0.70x0.70 m (0.49 m²) en el que se colocaron tres modelos de ventanas con diferentes condiciones de apertura (Figura 2 y Figura 3):

- Ventana pivotante con marco de aluminio de 51 mm y cierre de vidrio de 4 mm con sello, colocada con sellador elástico de poliuretano (marca Sika flex 1a),
- Ventana de estructura metamaterial con marco de MDF de 30 mm y estructura de lámina de acrílico transparente de 6 mm y material absorbente en aberturas interiores, colocada con sellador elástico de poliuretano (Figura 3b).

Ambas ventanas se analizaron en diferentes condiciones de apertura (Figura 4):

- Ventana pivotante: ventana cerrada (vc), ventana abierta a 45°(va45), ventana abierta a 30°(va30), ventana abierta a 15°(va15) y ventana abierta a 8°(va8).
- Estructura de metaventana (mm1)

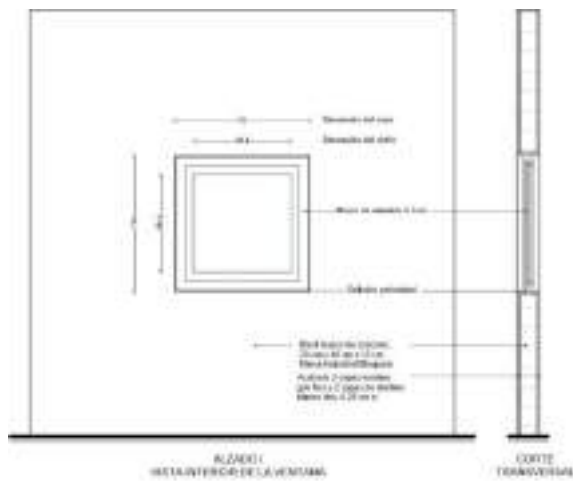


Figura 2. Abertura de vano sobre muro de block de concreto 20x40x12 cm con acabados en ambas caras.

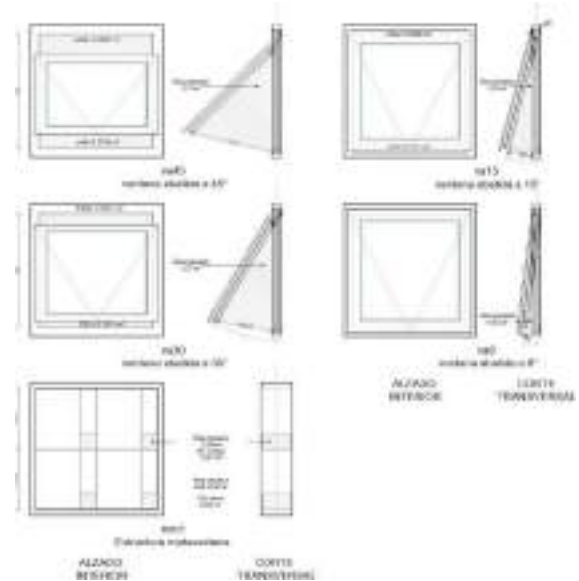


Figura 4. Área de ventilación I. Ventana pivotante: va45, va30, va15, va7 y II. Ventana estructura de metamaterial 1.



Figura 3. Ventanas colocadas en vano: a) Ventana pivotante: cerrada y abierta b) Estructura de metaventana: mm1.

4.1. Índice de reducción acústica de ventana

Para el cálculo de las propiedades de reducción acústica (R_i) y los valores globales (R_w , C y C_{tr}) se repitió el procedimiento seguido en el muro, utilizando la expresión (1) y (3), aunque esta vez se utilizó la superficie del vano como elemento de partición y adicionalmente se calculó el factor de corrección a partir de la expresión (2).

4.1.1. Área de ventilación

Para definir la capacidad de ventilación se consideró la superficie expuesta A_e (área libre del vano) de las diferentes aberturas presentadas. Para la ventana pivotante en sus diferentes condiciones de apertura, se consideró el área libre a paño interior de las dos caras de la abertura de ventana y la base de esta. Para la ventana mm1 se tomó en cuenta la superficie libre de la cara expuesta, las dimensiones se expresaron en m^2 .

Aunque la superficie del vano es la misma ($0.49 m^2$) la superficie expuesta libre del mismo presenta diferentes dimensiones, también por la diferencia en la construcción de las ventanas, la ventana pivotante abierta presenta de tres a cinco caras de superficie expuesta y se estima una incidencia del viento en diagonal.

La estructura de metaventana tiene una superficie de $0.0062 m^2$ repetida en los cuatro módulos y se estima una incidencia perpendicular del viento con valores de incidencia superiores.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Desempeño de la ventana

El índice de reducción acústica global de la ventana cerrada (R_{vc}) es de 30 dB y aplicando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) su desempeño es de 27.3 dB y de acuerdo con los valores de reducción acústica en su espectro, que se observan en la figura 5, se evidencia un desempeño superior en la banda de 500 Hz (27.4 dB) y a partir de la banda de frecuencia de 1000 Hz hasta las 5000 Hz el índice R presenta valores de 28.7 y 41.6 dB.

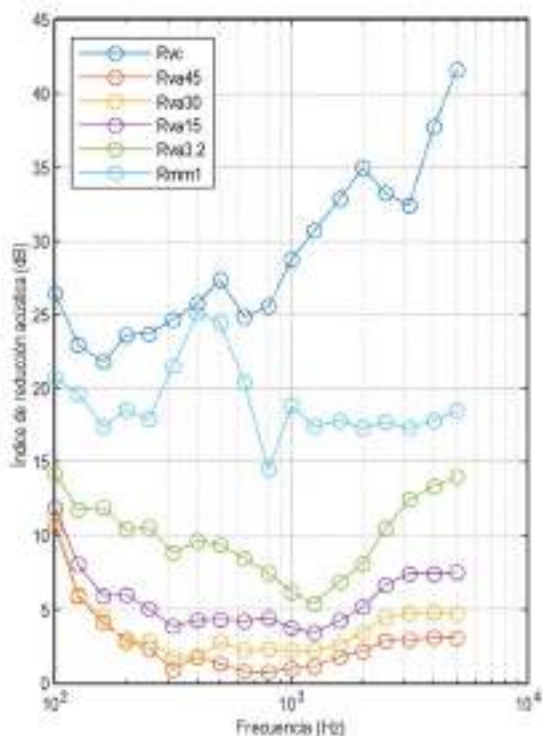


Figura 5. Índice de reducción acústica de ventana: a) Ventana cerrada (R_{vc}), Ventana abierta; b) a 45° (R_{va45}), c) a 30° (R_{va30}), d) Abertura 3.2 cm base ($R_{va3.2}$), y Estructura de metaventana (R_{mm1}).

Cuando se abre la ventana pivotante para los casos de va8, va15, va30 y va45, el índice de reducción acústica global de la ventana (R_w) para todos los casos es de 12 dB. Al comparar con otras investigaciones [18][25][26] la pérdida es la esperada y concuerda con un promedio de 12 dB para un sistema de cancelería con ventana abierta y aplicando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) su desempeño se reduce entre 7.6 y 1 dB; para va8 y va 45, ello se ve reflejado en el análisis espectral el desempeño es bajo en la mayor parte del espectro entre 3 y 1 dB de reducción y sólo en 100 Hz

presenta valores modestos de 10.7 dB a 11.8 dB en va45, va30 y va15, y para va8 el valor es moderado de 14.20 dB; este último evidencia un desempeño ligeramente superior a las condiciones de ventana.

En la ventana con módulos de estructura de metamaterial el índice de reducción acústica global (R_w) es de 18 dB y aplicando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) su desempeño permanece en 18 dB presentando mejor desempeño en bandas de frecuencias de 315, 400, 500 y 630 Hz de entre 20.4 y 25.1 dB este último para la banda de frecuencias de 500 Hz.

5.2 Índice de reducción acústica de una ventana y su área de ventilación

El desempeño acústico global (R_w) es similar a otros estudios [18][24] incluso entre todas las condiciones de ventana abierta es de 12 dB ante las diferentes condiciones de superficie expuesta libre de 0.59, 0.40, 0.19, 0.02 m², sin embargo, al considerar la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) el desempeño de las ventanas se modifica y corresponde con lo dicho por Salis [15] a mayor dimensión de apertura el desempeño acústico es menor.

La ventana con módulos de estructura de metamaterial (mm1) tiene una superficie expuesta libre de 0.02 m². El indicador R_w es de 18 dB, si se compara la condición de ventana va8 con la misma área libre y proporción la ventana mm1 supera el desempeño sobre la ventana pivotante va8.

Tabla 2. Desempeño de ventanas: índice de reducción acústica global e índice de reducción acústica ante tráfico vehicular

Tipo	R_w [dB]	$R_w + C_{tr}$ [dB]	A_e [m ²]
vc	30	27	0.00
va 45°	12	1	0.59
va 30°	12	3	0.40
va 15°	12	4	0.19
va 8°	12	8	0.02
mm1	18	18	0.02

5.3 Aislamiento acústico de una ventana frente a ruido de tráfico vehicular

Utilizando la corrección por ruido de tráfico ($R_w + C_{tr}$) la vc presenta un desempeño de 27 dB y los elementos de ventana pivotante abierta va45, va30, va15 y va8 presentan un desempeño pobre y bajo, en algunos casos como v45, cercano a cero (1 dB), el mejor desempeño de esta ventana es en el

caso va8 con valor de $R_w + C_{tr}$ 8 dB, 4 de su desempeño global que supera la diferencia apenas notable (jnd).

El segundo mejor desempeño se obtuvo en el caso mm1 con valor de $R_w + C_{tr}$ 18 dB igual a su valor global.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza el desempeño acústico de sistemas de ventana ventilada ante ruido de tráfico vehicular. Se observa que el valor global R_w no es recomendable para la toma de decisiones cuando se buscan desempeños específicos, como en este caso el ruido de tráfico vehicular es descrito de forma más eficaz $R_w + C_{tr}$ o a partir del análisis de los valores de R_i para cada banda de frecuencia.

En la mayoría de los casos se presenta bajo aislamiento en bajas frecuencias, es decir mayor aportación de bajas frecuencias en el recinto receptor y por lo tanto en el espacio interior de la vivienda. Las ventanas con apertura y áreas libres disminuyen drásticamente su desempeño en proporción a A_e .

La estructura de metaventana ha demostrado ser una solución superior ante condiciones similares de A_e como el caso de va8. Aunque se sugiere la comparación del desempeño ante el flujo de aire para robustecer su viabilidad.

AGRADECIMIENTOS

La Mtra. Dulce Rosario Ponce Patrón es estudiante doctoral del Programa de doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y recibe una beca del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT). Se agradece el apoyo del Programa de Doctorado y maestría en arquitectura de la UNAM a través del Programa de Apoyo a los Estudiantes de Posgrado (PAEP).

Se agradece el apoyo de la DGAPA-UNAM al proyecto PAPIIT número IT100723: “Medición de absorción, aislamiento y difusión acústica de materiales por reflectometría y transmisión en régimen transitorio”.

8. REFERENCIAS

[1] COST Action TU0901(2014) “Building acoustics throughout Europe”. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe, 2014. P.

[2] Torresin S, Albatici R, Aletta F, Babich F, Oberman T, Kang J. Acoustic Design Criteria in Naturally Ventilated Residential Buildings: New Research Perspectives by Applying the Indoor Soundscape Approach. *Applied sciences* 2019; 9, 5401: 01-24

[3] Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering* 41 (2021) 102773: 1:10

[4] Yang W, Jeon JY. Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment* 182 (2020) 107121

[5] De construcción de México, R. (2020). Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico. Gobierno del Distrito Federal.

[6] Mexicano, G. F. (2010). Código de Edificación de Vivienda CONAVI.

[7] Garg, N., Sharma, O., & Maji, S. (2012). Design considerations for enhancing sound insulation characteristics of window glazing for traffic noise abatement. *Building Acoustics*, 19(2), 89-97.

[8] Harvie-Clark, J., & Chilton, A. (2020, October). Acoustics Ventilation and Overheating: Residential Design Guide. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 261, No. 5, pp. 1186-1194). Institute of Noise Control Engineering.

[9] ISO, E. (2011). 10140-2: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte, 2, 10140-2.

[10] ISO, E. 10140-1: 2011. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte, 1.

[11] ISO 717-1 Acoustics -Rating of sound insulation in buildings and building elements-. (2013): 1-18

[12] ISO, E. 16283-3: 2016. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte, 3.

[13] ISO, E. 12354-3: 2017. Building Acoustics, Estimation of Acoustic Performance of Buildings from the Performance of Elements—Part, 3.

[14] Kumar, S., Xiang, T. B., & Lee, H. P. (2020). Ventilated acoustic metamaterial window panels for simultaneous noise shielding and air circulation. *Applied Acoustics*, 159. <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.apaco.ust.2019.107088>

[15] De Salis, M. H. F., Oldham, D. J., & Sharples, S. (2002). Noise control strategies for naturally ventilated buildings. *Building & Environment*, 37(5), 471. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00047-6)

[16] Díaz Sanchidrián, C., Pedrero González, A., & Navacerrada Saturio, M. D. L. Á. (2008). Los huecos de las fachadas de los recintos y su protección frente al ruido.

[17] ASHRAE (Firm). (2017). ASHRAE Pocket Guide for Air Conditioning, Heating, Ventilation, Refrigeration: Vol. Ninth edition, SI. ASHRAE.

[17] Sang-Hoon Kim, Seong-Hyun Lee, "Air transparent soundproof window", *AIP Advances* 4, 117123 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4902155>

[18] Locher, B., Piquerez, A., Habermacher, M., Ragetli, M., Rösli, M., Brink, M., ... & Wunderli, J. M. (2018). Differences between outdoor and indoor sound levels for open, tilted, and closed windows. *International journal of environmental research and public health*, 15(1), 149.

[19] Bajraktari, E., Lechleitner, J., & Mahdavi, A. (2015). Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia*, 78, 140-145.

[20] Yang W, Jeon JY. Design strategies and elements of building envelope for urban acoustic environment. *Building and Environment* 182 (2020) 107121

[21] Li, X., Tang, S. K., Yim, S. Y., Lee, R. Y., & Hung, T. (2020). Noise reduction of plenum windows on the façade of a high-rise



residential building next to heavy road traffic. *Building and Environment*, 186, 107353.

[22] Jin, X., Fang, H., Yu, X., Xu, J., & Cheng, L. (2023). Reconfigurable origami-inspired window for tunable noise reduction and air ventilation. *Building and Environment*, 227(Part 1). <https://doi.uam.elogim.com/10.1016/j.buildenv.2022.109802>

[23] Li, X., Tang, S. K., Yim, S. Y., Lee, R. Y., & Hung, T. (2020). Noise reduction of plenum windows on the façade of a high-rise residential building next to heavy road traffic. *Building and Environment*, 186, 107353.

[24] Waters-Fuller, T., Lurcock, D., Mackenzie, R., & MacKenzie, R. NANR116 Open-Closed Window Research Report.

[25] Cox, T., & d'Antonio, P. (2017). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press.



SG ACUSTIC. SOFTWARE PARA EL CÁLCULO TEÓRICO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO. COMPROBACIÓN DEL DB HR Y PRECLASIFICACIÓN ACÚSTICA DE LOS EDIFICIOS

Penélope González de la Peña^{1*}
Nicolás Bermejo Presa²

¹Responsable desarrollo herramientas digitales Saint-Gobain Solutions

²Director Technical & Sustainability Saint-Gobain Solutions

RESUMEN

En Tecniacústica 2022, se lanzó el complemento de Ce3X ipAcustic, para la comprobación del DB HR mediante la opción simplificada y la preclasificación acústica del edificio basada en la UNE 74201.

Presentamos la evolución de ipAcustic: SGAcustic. El complemento se sigue integrando en el software para la certificación energética Ce3X, lo que permite a los técnicos que realizan las comprobaciones de térmica del edificio realizar las comprobaciones del DB HR sin necesidad de modelizar en otro software.

Las novedades que tiene SGAcustic son:

- Introducción de nuevos sistemas en la base de datos de soluciones constructivas.
- Posibilidad de realizar el cálculo del aislamiento acústico de un sistema constructivo utilizando las características físicas de los materiales que componen el cerramiento (masa superficial, módulo de elasticidad, resistencia al paso del aire...).

En el paper se analizarán las novedades del software junto con un estudio de la correlación entre el cálculo del aislamiento acústico utilizando las características físicas de los elementos que componen el cerramiento y los ensayos de laboratorio de los mismos sistemas.

ABSTRACT

In Tecniacústica 2022, Saint-Gobain launched the add-on ipAcustic, included in Ce3X program, to verify compliance with the DB HR standard through the simplified option and the Acoustic preclassification based in UNE 74201.

We present the evolution of ipAcustic: SGAcustic. The add-on is still included in the energetic certification software Ce3X, this allows technicians verify the thermal behavior in the building and verify also the acoustic conditions in the same software.

The SGAcustic news are:

- New acoustic systems in the database included in the add-on.
- The possibility to make the calculation of the acoustic insulation of a system using the physical characteristics of each material (mass, elasticity module, air flow resistance...). The technician can introduce the own systems even the system are not included in the database neither have an acoustic test.

In the paper, we analyze the software news with an study with the correlation between the acoustic calculation using the physical characteristic and the acoustic test in laboratory.

Palabras Clave— DB HR, Clasificación Acústica, software calculo acústico, aislamiento acústico sistema

1. INTRODUCCIÓN

En 2022, Saint-Gobain lanzó ipAcustic, un complemento para la realización de la comprobación del cumplimiento del DB HR mediante la opción simplificada, así como la precalificación acústica del edificio basada en la norma UNE 74201.

ipAcustic es un complemento que se encuentra integrado dentro de Ce3X, el programa para realizar la certificación energética más utilizado en España, con un esquema similar al utilizado para en la certificación energética, de esta forma, con el mismo programa y sin necesidad de modelizar de nuevo el edificio, el técnico puede comprobar la parte térmica y acústica del edificio, analizando los diferentes elementos y su prestación acústica, orientando las soluciones constructivas para, nos solo cumplir con el CTE DB HR, si no para conseguir el mejor confort acústico posible, analizándolo mediante la norma UNE 74201 “Acústica. Esquema de clasificación acústica de edificios”.

* **Autor de contacto:** penelope.gonzalez@saint-gobain.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Desde su lanzamiento en 2022, ipAcustic ha tenido más de 3.000 usos en el último año, ayudando a realizar de una forma sencilla el estudio acústico del edificio.

Con el objetivo de mejorar el programa, se ha realizado el lanzamiento en 2023 de SGAcustic, la evolución de ipAcustic; con una base de datos de sistemas constructivos ampliada y permitiendo la posibilidad de realizar el cálculo del aislamiento acústico de los sistemas constructivos que no se encuentren en la base de datos ni tengan realizado un ensayo acústico.

2. ESTRUCTURA DE SGACUSTIC

En el menú “Complementos” de Ce3X, se añade SGAcustic al instalarlo desde las páginas web de Efinovatic, Placo® e Isover. Una vez accedemos al menú, aparecen las siguientes opciones:

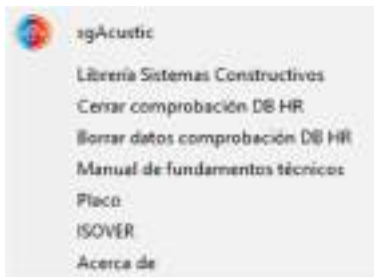


Figura 1. Estructura SGAcustic

Dentro de la opción “sgAcustic” se accede al programa donde se realiza la comprobación del DB HR y la preclasificación acústica del edificio, con el siguiente esquema:

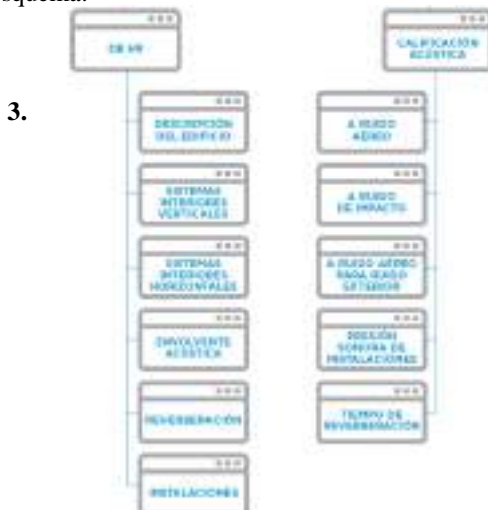


Figura 2. Esquema validación normativa

Dentro de la opción “Librería Sistemas Constructivos” pasamos al menú que permite incorporar nuevos sistemas constructivos con sus características acústicas, así como realizar el cálculo del aislamiento acústico de un cerramiento definido por sus diferentes capas.



Figura 3. Menú Librería sistemas Constructivos

Para introducir un sistema constructivo del que ya tenemos un ensayo acústico realizado, se debe entrar en la solución constructiva que queramos incluir en el botón “Crear/Modificar”. Dependiendo del sistema constructivo, el complemento solicita los diferentes filtros que tenemos en cuenta, para luego poder filtrar la solución constructiva dentro de SGAcustic, así como una descripción del sistema que será el nombre por el que después saldrá en el programa y sus características acústicas y valores de aislamiento. Si se necesita modificar algún sistema previamente introducido, se modifica también en esta pantalla.



Figura 4. Creación elemento con datos acústicos conocidos

3. CÁLCULO AISLAMIENTO ACÚSTICO CERRAMIENTO DEFINIDO POR CAPAS

Si se desconocen las características acústicas de un sistema constructivo que se debe incorporar al proyecto, SGAcoustic permite realizar un cálculo sencillo de las características solicitadas para la comprobación del DB HR mediante la Opción Simplificada. Para ello, las fórmulas que se han implementado en cada una de las diferentes soluciones son las siguientes:

3.1. Partición interior vertical

3.1.1. Tipo 1 sin trasdosado de una hoja

Si $m < 150 \text{ kg/m}^2$ $R_A = 16.6 * \log m + 5$

Si $m > 150 \text{ kg/m}^2$ $R_A = 36.5 * \log m - 38,5$

m = suma de las masas de cada una de las capas que componen el cerramiento

3.1.2. Tipo 1 sin trasdosado de dos hojas separadas por un material intercalario

$$R_A = 37,5 * \log(m1+m2) - 42 + 0,05 * d$$

- $m1$ = suma de las masas de la hoja 1
- $m2$ = suma de las masas de la hoja 2
- d = espesor de la lana mineral utilizada como material intercalario.

La fórmula solo es válida si la suma de $m1$ y $m2 > 150 \text{ kg/m}^2$ y d se encuentra comprendido entre 3 y 10 cm.

3.1.3. Tipo 1 con trasdosado. Una hoja con trasdosado a una cara

$$R_A = R1 + \Delta R$$

$R1$ = fórmulas utilizadas en 3.1.1. para el aislamiento acústico de la parte masiva del elemento

ΔR = incremento que se produce al añadir el trasdosado en una de las caras del elemento masivo. Depende del Edyn (módulo de elasticidad) del material intercalario y de la f_0 del sistema. En el apartado 3.9. se indica como se realiza este cálculo.

3.1.4. Tipo 1 con trasdosado. Una hoja con trasdosado en ambas caras.

$$R_A = R1 + 1,5 * \Delta R$$

$R1$ = fórmulas utilizadas en 3.1.1. para el aislamiento acústico de la parte masiva del elemento

ΔR = incremento que se produce al añadir el trasdosado en una de las caras del elemento masivo. Depende del Edyn

(módulo de elasticidad) del material intercalario y de la f_0 del sistema. En el apartado 3.9. se indica como se realiza este cálculo.

3.1.4. Tipo 2 Dos hojas con bandas elásticas perimétricas

En este caso la aplicación no tiene fórmulas para realizar el cálculo.

3.1.5. Tipo 3 de entramado autoportante con estructura simple

$$R_A = 20 * \log(m1+m2) + \log(d) + d + 5$$

- $m1$ = masa de las placas de una de las caras del cerramiento
- $m2$ = masa de las placas de la otra cara del cerramiento
- d = espesor de la lana mineral en la estructura del entramado

La fórmula solo es válida si $m1$ y $m2$ son $< 70 \text{ kg/m}^2$, si superan esta masa superficial el cálculo se debe realizar como Tipo 1. Si $d > 10 \text{ cm}$ la fórmula no es válida para realizar el cálculo acústico por capas.

3.1.6. Tipo 3 de entramado autoportante con estructura doble

Si la estructura doble es arriostrada, la aplicación no tiene fórmulas para realizar el cálculo.

Si la estructura doble es sin arriostrar, la fórmula utilizada es:

$$R_A = 20 * \log(m1+m2) + \log(d) + d + 10$$

- $m1$ = masa de las placas de una de las caras del cerramiento
- $m2$ = masa de las placas de la otra cara del cerramiento
- d = espesor de la lana mineral en la estructura del entramado

La fórmula solo es válida si $m1$ y $m2$ son $< 70 \text{ kg/m}^2$, si superan esta masa superficial el cálculo se debe realizar como Tipo 1. Si $d > 20 \text{ cm}$ la fórmula no es válida para realizar el cálculo acústico por capas.

3.2. Trasdosados

La fórmula de cálculo que utiliza el complemento es la del apartado 3.9. debiendo conocerse además la composición del elemento masivo sobre el que va a ir el trasdosado.

3.3. Puertas

La aplicación no contempla fórmulas para el cálculo acústico de las puertas

3.4. Forjados

3.4.1. Forjados sin suelos flotantes ni techos suspendidos

Ruido aéreo:

Si $m < 150 \text{ kg/m}^2$ $R_A = 16.6 * \log m + 5$

Si $m > 150 \text{ kg/m}^2$ $R_A = 36.5 * \log m - 38,5$

Ruido de impacto:

Si $m > 100 \text{ kg/m}^2$ o $m < 600 \text{ kg/m}^2$ $L_w = 164 - 35 * \log(m)$

Si $m < 100 \text{ kg/m}^2$ o $m > 600 \text{ kg/m}^2$ $L_w = \text{No se puede realizar el cálculo con las fórmulas implementadas en el complemento.}$

3.4.2. Forjados con suelo flotante

Ruido aéreo:

$$R_A = R_I + \Delta R$$

R_I = fórmulas utilizadas en 3.4.1. para el aislamiento acústico de la parte masiva del forjado.

ΔR = incremento que se produce al añadir el trasdosado en una de las caras del elemento masivo. Depende del E_{dyn} (módulo de elasticidad) del material intercalario y de la f_0 del sistema. En el apartado 3.9. se indica como se realiza este cálculo.

Ruido de impacto:

Si $SD < 50$ $\Delta L = (-0,00338 * (m_1 + m_2) -$

$5,7929 * \log(SD) + 7,2985 * \log(m_1 + m_2) + 13,463$

Si $SD > 50$ $\Delta L = \text{No se puede realizar el cálculo con las fórmulas implementadas en el complemento}$

3.4.3. Forjados con techo suspendido

$$R_A = R_I + \Delta R$$

R_I = fórmulas utilizadas en 3.4.1. para el aislamiento acústico de la parte masiva del forjado.

ΔR = incremento que se produce al añadir el trasdosado en una de las caras del elemento masivo. Depende del E_{dyn} (módulo de elasticidad) del material intercalario y de la f_0 del sistema. En el apartado 3.9. se indica como se realiza este cálculo.

3.4.4. Forjados con suelo flotante y techo suspendido

Ruido aéreo:

$$R_A = R_I + \Delta R_{\text{suelo}} + \Delta R_{\text{techo}}$$

R_I se calcula según el apartado 3.4.1.

ΔR_{suelo} se calcula según el apartado 3.4.2.

ΔR_{techo} se calcula según el apartado 3.4.3.

Ruido de impacto:

$$L_w = L_I - \Delta L$$

L_I = fórmulas utilizadas en 3.4.1.

ΔL = fórmulas utilizadas en 3.4.2.

3.5. Suelos flotantes

La fórmula de cálculo que utiliza el complemento es la del apartado 3.9. debiendo conocerse además la composición del elemento masivo sobre el que va a ir el suelo flotante.

3.6. Techos suspendidos

La fórmula de cálculo que utiliza el complemento es la del apartado 3.9. debiendo conocerse además la composición del elemento masivo sobre el que va a ir el techo suspendido.

3.7. Fachadas

La selección y los cálculos que realiza el complemento son las mismas fórmulas que en el apartado 3.1. debiendo elegirse los elementos en base a la siguiente composición:

- Fachada de una hoja simple
- Fachada de dos hojas
- Fachada de una hoja con trasdosado
- Fachada de dos hojas sobre bandas elásticas perimetrales
- Fachada ligera con doble estructura arriostrada
- Fachada ligera con doble estructura sin arriostrar

3.8. Cubiertas

El apartado de cubiertas utiliza las mismas fórmulas que el apartado 3.4.

3.9. Cálculo incremento de aislamiento producido por un trasdosado, suelo flotante o techo suspendido

La fórmula de cálculo para el incremento de aislamiento producido por un trasdosado depende de los siguientes elementos:

- E_{dyn} = Módulo de elasticidad del material elástico en el trasdosado
- d = espesor de la lana mineral utilizada como material intercalario
- m_1 = suma de las masas del elemento masivo que compone el cerramiento
- m_2 = suma de la placa o placas de yeso laminado que componen el trasdosado

$$s' = E_{dyn} / d * 0,01$$

$$f_0 = 160 * \text{RAIZ}(s' * (1/m_1 + 1/m_2))$$

$R1$ = cálculo del aislamiento acústico de la parte masiva del cerramiento según lo indicado en los puntos anteriores

Dependiendo del valor de f_0 que se obtenga se utilizan las siguientes fórmulas para el cálculo del ΔR :

Tabla 1. Valor de ΔR dependiendo de la f_0 obtenida.

f_0	ΔR
<80	$35-R1/2$
$80 \leq f_0 < 100$	$32-R1/2$
$100 \leq f_0 < 125$	$30-R1/2$
$125 \leq f_0 < 160$	$28-R1/2$
$160 \leq f_0 < 200$	-1
$200 \leq f_0 < 250$	-3
$250 \leq f_0 < 315$	-5
$315 \leq f_0 < 400$	-7
> 400	No se puede realizar el cálculo

4. RELACIÓN CÁLCULO TEÓRICO Y ENSAYOS ACÚSTICOS.

Con el objetivo de validar estos cálculos teóricos y ver si el aislamiento acústico conseguido se queda por debajo de los ensayos acústicos realizados (quedando así del lado de la seguridad), se han tomado diferentes tipologías de cerramientos definidas y se han comparado con los ensayos acústicos realizados.

En todos los casos las diferencias son menores de 2 dB por lo que los cálculos, siendo siempre aconsejable el uso de sistemas ensayados en laboratorio, pueden servir como aproximación en el caso de no contar con los ensayos.

En este caso se debe tener en cuenta que los cálculos corresponderían solo al cerramiento calculado, sin tener en cuenta las modificaciones en el aislamiento que se podrán producir por transmisiones laterales, defectos de ejecución...

5. INTRODUCCIÓN SISTEMAS EN SGACUSTIC.

Una vez creada la librería de sistemas constructivos con su aislamiento, estos van a aparecer dentro de la base de datos de SGAcustic para poderlos introducir dentro del edificio y realizar la comprobación del DB HR y la pre-clasificación acústica del edificio.



Figura 5. Filtro de sistemas con la opción de “Sistemas calculados por capas”

Elijiendo esta opción solo aparecerán en los resultados las soluciones creadas por el técnico. También aparecerán si se seleccionan los filtros que se han ido creando conforme se realizaba el cálculo del cerramiento.

Los valores se incorporan en el programa para su utilización en los cálculos que realiza, así como la salida de los check-list de comprobación.

12. REFERENCIAS

- [1] SGAcustic. <https://www.saint-gobain.es/software-y-programas-de-calculo>.
- [2] Código Técnico de la Edificación. Documento básico de Protección frente al ruido. CTE DB-HR.
- [3] UNE 74201. Acústica. Esquema de clasificación acústica de edificios.

EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE LOS VIDRIOS EN EDIFICACIÓN

Penélope González de la Peña^{1*}
Fernando de la Rubia Jiménez²

¹Responsable desarrollo herramientas digitales Saint-Gobain Solutions

²Jefe Soluciones Vidrio Saint-Gobain Solutions

RESUMEN

Uno de los puntos más importantes en el estudio del comportamiento acústico de los edificios son los huecos existentes en la envolvente de este.

Por un lado, están expuestos al ruido del exterior, normalmente ruido de tráfico, con una componente en bajas frecuencias importante y por el otro, los vidrios presentan unas características acústicas diferentes al comportamiento de las partes ciegas en fachadas y cubiertas. Todo ello, junto con las uniones entre vidrio y carpinterías y la ventana al completo con la parte ciega, hace que en los huecos tenga que realizarse un estudio acústico a la hora de hacer el proyecto de acústica de una edificación, sobre todo cuando el edificio se encuentra en zonas expuestas al ruido del exterior donde la normativa es mucho más restrictiva.

En este paper analizaremos el comportamiento acústico de los vidrios para ventanas con las diferentes estrategias para mejorarlos y cuáles son las más indicadas en cada circunstancia. Veremos también en que se está trabajando dentro del I+D+i de los fabricantes para su mejora acústica en el futuro.

ABSTRACT

One of the most important points in the study of the acoustic behavior of buildings are the openings in the building envelope.

On the one hand, the openings are exposed to exterior noise, usually traffic noise, with a significant low frequency component, and on the other hand, the glass has different acoustic characteristics to the behavior of the rest of construction systems present in the envelope (façades, roofs...). All this points, together with the joints between glass and carpentry and the whole window with the envelope, means that the openings must have and acoustic study when carrying out the acoustic project of a building, especially when the building is located in external noise exposed areas where the norms are much more restrictive.

In this paper we will analyze the acoustic behavior of glasses for windows with the different strategies to improve them and which are the most suitable in each circumstance. We will also see what is being worked on the R+D manufacturer teams for acoustic improvements in the future.

Palabras Clave— Vidrios, Ventanas, Acústica edificios, I+D

1. INTRODUCCIÓN

El Código Técnico de la Edificación establece en su documento básico de protección frente al ruido (DB HR) los requerimientos acústicos solicitados en la envolvente del edificio dependiendo del nivel de ruido exterior que tenga el edificio.

En el Apartado 2.1. “Valores límite de aislamiento” se establecen las exigencias acústicas mínimas de atenuación acústica a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$ de los elementos constructivos de las fachadas, las cubiertas y del resto de elementos que conforman la envolvente del edificio.

Lvl DB(A)	Límite del edificio			
	Residencial y terciario		Edificios públicos	
	Comercio	Oficina	Escuelas	Ases
La (dB)	30	30	20	30
La + La (dB)	20	30	20	30
La + La (dB)	20	30	20	30
La + La (dB)	40	30	40	30
La + La	40	30	40	30

Figura 1. Apartado 2.1. “Valores límite de aislamiento”

Complementario a estos valores, se establecen los valores mínimos exigibles a los huecos en función del porcentaje de huecos que haya en la parte ciega junto con el nivel exigido en el Apartado 2.1. En la tabla 3.4. del documento se establecen los valores mínimos que deben cumplir los elementos que forman los huecos y la parte ciega de la fachada:

* **Autor de contacto:** penelope.gonzalez@saint-gobain.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Nivel límite exigido (Tabla 2.1) $R_{w, \text{req}}$ (dB)	Parte carga $\geq 50\%$ $R_{A, \text{c}}$ (dB)	Parte carga $< 50\%$ $R_{A, \text{c}}$ (dB)	Niveles Porcentaje de ruido $R_{A, \text{c}}$ de las componentes del ruido $R_{w, \text{req}}$ (dB)				
			Hasta 10%	De 10 a 30%	De 31 a 60%	De 61 a 90%	De 91 a 100%
Criterio = 30	33	35	28	28	31	32	33
		40	28	28	30	31	
		45	28	28	30	31	
Criterio = 32	35	35	30	32	34	34	35
		40	27	30	32	34	
		45	29	30	32	33	
Criterio = 34	38	40	30	33	35	35	38
		45	28	32	34	35	
		50	28	31	34	35	
Criterio = 36	38	40	33	35	37	36	38
		45	31	34	36	37	
		50	30	33	35	37	
Criterio = 37	38	40	34	37	38	36	38
		45	32	35	37	36	
		50	31	34	37	36	



Figura 3. Vidrio monolítico

En este caso, la masa (definida en gran medida por el espesor del vidrio) va a absorber parte de las ondas sonoras provenientes del exterior, en el siguiente cuadro se pueden ver diferentes ensayos sobre vidrios simples y el aislamiento que ofrecen:

Tabla 1. Valores de aislamiento vidrios simples

Tipología	Tipo	Espesor (mm)	Masa (kg)	R_w (dB)	R_A (dBA)	R_{Atr} (dBA)
Vidrio simple	SGG Planilux	4	18	30 (-2;-2)	28	28
Vidrio simple	SGG Planilux	6	27	32(-1;-2)	31	30
Vidrio simple	SGG Planilux	8	36	33 (-2;-1)	32	31
Vidrio simple	SGG Stadip	20	84	40(-1;-2)	39	38
Vidrio simple	SGG Stadip	41	178	47(-1;-5)	46	42

Conforme se incrementa el espesor del vidrio y por tanto su masa, el aislamiento acústico proporcionado es mayor, pero, para conseguir aislamientos altos, se necesita llegar a unos espesores y unas masas muy altas que hacen inviable la colocación de este tipo de vidrios de forma masiva.

Nivel límite exigido (Tabla 2.1) $R_{w, \text{req}}$ (dB)	Parte carga $\geq 50\%$ $R_{A, \text{c}}$ (dB)	Parte carga $< 50\%$ $R_{A, \text{c}}$ (dB)	Niveles Porcentaje de ruido $R_{A, \text{c}}$ de las componentes del ruido $R_{w, \text{req}}$ (dB)				
			Hasta 10%	De 10 a 30%	De 31 a 60%	De 61 a 90%	De 91 a 100%
Criterio = 41	43	45	38	40	42	43	43
		48	38	39	41	42	
		50	38	39	41	42	
Criterio = 42	44	50	37	40	42	43	44
		55	36	39	42	43	
		60	36	39	42	43	
Criterio = 45	45	50	42	45	47	48	48
		55	41	44	46	47	
		60	40	43	46	47	
Criterio = 47	46	55	42	45	47	48	49
		60	41	44	47	48	
		65	42	45	47	48	
Criterio = 51	52	58	48	50	52	53	53
		65	48	49	51	52	
		70	48	49	51	52	

Figura 2. Tabla 3.4. DB HR

2. COMPORTAMIENTO DE LOS VIDRIOS

En este paper vamos a ver cómo es el comportamiento de los vidrios que se utilizan en las configuraciones más habituales de ventanas, junto con vidrios de altas prestaciones.

En todas las simulaciones y ensayos, se debe tener en cuenta que después hay que añadir el comportamiento acústico de todo el conjunto de la ventana: marco, capialzado, uniones a la parte opaca del cerramiento, tipo de ventana... que van a modificar el aislamiento conseguido por el vidrio.

Las estrategias que podemos emplear para el aislamiento acústico en los vidrios son similares a las que tenemos en el resto de cerramientos utilizados en construcción:

2.1. Comportamiento vidrios simples

Un vidrio simple o monolítico es aquel formado solo por una masa vítrea, sin ningún otro tipo de capa o tratamiento.

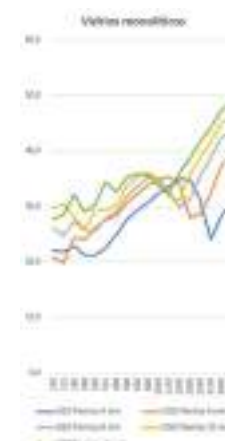


Figura 4. Gráfico aislamiento acústico vidrios monolíticos

Podemos observar que conforme incrementamos el espesor, y por tanto la masa del vidrio monolítico, se incrementan los valores de aislamiento, trasladando eso si la frecuencia crítica hacia la izquierda de espectro.

2.2. Comportamiento vidrios laminados

El vidrio laminar es un acristalamiento de seguridad compuesto de dos o más láminas de vidrio entre las que se intercala algún otro material, como el butiral de polivinilo (PVB), esta lámina intercalaria puede ser translúcida o transparente, tener colores, incluir dibujos, diodos...

En caso de choque o impacto este material intercalario mantiene los vidrios unidos, por lo que si el vidrio se rompe los trozos permanecen unidos, haciendo un vidrio más seguro que los monolíticos.



Figura 5. Vidrio laminado

El vidrio laminar va a mejorar el comportamiento frente a un vidrio monolítico del mismo espesor, al igual que ocurre con los sistemas constructivos de la parte ciega cuando tienen sistemas masa-muelle-masa.

Dependiendo del espesor de la cámara que se intercale entre los dos vidrios y de qué esté rellena, el aislamiento acústico puede variar, igualmente variará cuando el espesor de los vidrios colocados en cada una de las caras cambie, modificando las frecuencias de coincidencia y mejorando por tanto el comportamiento global del conjunto.

Se han realizado diferentes simulaciones con diferentes modificaciones para ver cómo se produce esta variación.

2.3. Vidrio simple vs Vidrios laminados

El mínimo espesor de vidrio laminar es un 22.1, es decir, dos vidrios de 2 mm con un material intercalario o cámara de aire de 1 mm. El espesor máximo al que llegamos con los vidrios laminados de forma estándar es hasta un 66.2, dos vidrios de 6 mm. Con un material intercalario de 2 mm.

Los ensayos y simulaciones realizados con los vidrios laminados son los siguientes:

Tabla 2. Valores de aislamiento vidrios laminados

Tipología	Tipo	Espesor (mm)	Masa (kg)	Rw (dB)	RA (dBA)	RATr (dBA)
Vidrio laminar	SGG Stadip 22.1	5	12	31(-1;-2)	30	29
Vidrio laminar	SGG Stadip 33.1	7	27	33(-1;-2)	32	31
Vidrio laminar	SGG Stadip Protect 44.2	9	36	34(-1;-2)	33	32
Vidrio laminar	SGG Stadip Protect 55.2	11	46	36(-1;-2)	35	34
Vidrio laminar	SGG Stadip Protect 66.2	13	56	35(-1;-3)	34	32

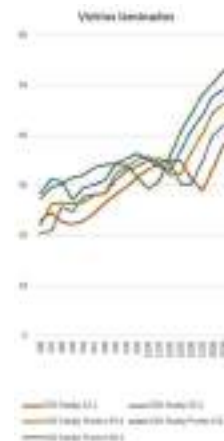


Figura 6. Gráfico aislamiento acústico vidrios laminados

El comportamiento en los vidrios laminados es igual que en los vidrios monolíticos, a mayor espesor del vidrio incrementamos el aislamiento, moviendo la frecuencia crítica hacia la izquierda.

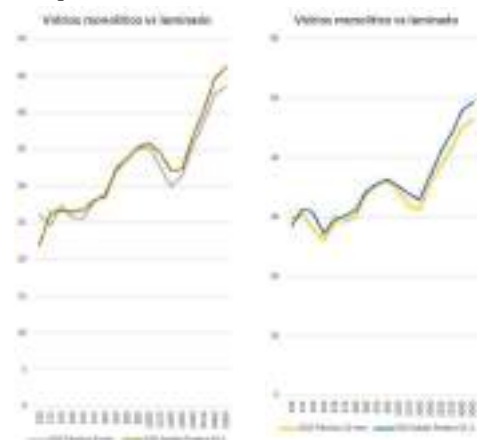


Figura 7. Gráfico vidrio monolítico vs vidrio laminado

El incremento de aislamiento que se produce está en torno a 1-2 dB con la mejora además en las siguientes prestaciones:

- Mayor nivel de resistencia
- Es un cristal prácticamente inseparable (en caso de rotura, la lámina ejerce de retención y evita que el cristal se haga añicos)
- El vidrio laminado aumenta la seguridad
- Protege a las personas frente a los riesgos de heridas en caso de rotura
- Filtra los rayos solares ultravioletas con el PVB en más de un 95%
- Sirve para mejorar los efectos de degradación del color
- El vidrio laminado da mejores prestaciones con, en general, menor peso.

En todos los casos existe un ligero incremento de aislamiento al pasar de vidrio monolítico a vidrio laminar, excepto en el último caso, en el que no se disponen de ensayos realizados sobre el vidrio si no que se ha hecho una simulación, las simulaciones, por lo general, ofrecen valores más bajos de aislamiento que cuando se realiza el ensayo en laboratorio.

2.4. Vidrios laminados con modificación en el espesor del intercalario y en el material.

Dentro del espacio que tienen los vidrios laminares, nos podemos encontrar diferentes materiales intercalarios que pueden modificar el comportamiento acústico, los materiales intercalarios de los vidrios laminados utilizados habitualmente son:

- PVB butiral de polivinilo
- SIL intercalario acústico

Tabla 3. Valores de aislamiento vidrios con intercalario acústico.

Tipología	Tipo	Espesor (mm)	Masa (kg)	Rw (dB)	RA (dBA)	RAtr (dBA)
Vidrio laminar	SGG STADIP SILENCE 22.1	5	11	33(-1;-4)	32	29
Vidrio laminar	SGG STADIP SILENCE 33.1	7	27	35(0;-3)	35	32
Vidrio laminar	SGG STADIP SILENCE 44.2	9	36	37(0;-3)	37	34
Vidrio laminar	SGG STADIP SILENCE 55.2	11	46	38(0;-2)	38	36
Vidrio laminar	SGG STADIP SILENCE 66.2	13	55	39(0;-2)	39	37

El vidrio laminar con interlayer acústico reduce la pérdida de aislamiento acústico en las proximidades de la frecuencia crítica, mejorando el aislamiento acústico ofrecido. Se puede observar que en los casos de los vidrios SILENCE, el factor C de corrección a ruido rosa es de 0, siendo además los térmicos de R_A y R_{Atr} mayores que en los vidrios laminares con PVB simple en su interior.

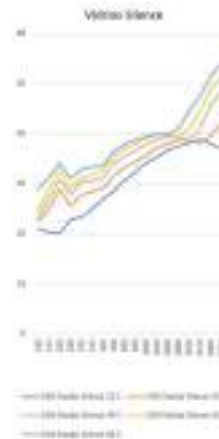


Figura 8. Gráfico vidrio intercalario acústico

Se puede observar en el gráfico que en estos casos la frecuencia crítica queda atenuada con el intercalario acústico, lo que ayuda a tener mejores prestaciones.

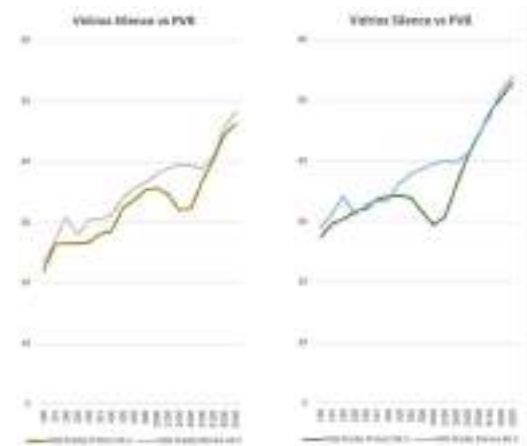


Figura 9. Gráfico vidrio Silence vs PVB

Si comparamos el comportamiento de los vidrios con PVB a los vidrios con SIL, podemos observar que el Silence da mejor prestación acústico, atenuándose la frecuencia crítica del vidrio.

2.7. Vidrios dobles



Figura 10. Vidrio doble

El doble acristalamiento contribuye a la mejora del aislamiento acústico, aumentando el valor del aislamiento medio y reduciendo el efecto de pérdida de aislamiento en el entorno de la frecuencia crítica.

Tabla 4. Valores de aislamiento vidrios dobles

Tipología	Tipo	Espesor (mm)	Masa (kg)	Rw (dB)	RA (dBA)	RAtr (dBA)
Vidrio doble	SGG Climalit Protect 33.2 16AIR 33.2	28	54	39(-1;-6)	38	33
Vidrio doble	SGG Climalit Protect 44.2 16AIR 44.2	34	76	40(-2;-6)	38	34
Vidrio doble	SGG Climalit 44.2SIL 16AIR 44.2SIL	34	76	45(-2;-7)	43	38
Vidrio doble	SGG Climalit Protect 55.2SIL 16AIR 44.2SIL	36	85	48(-3;-8)	45	40

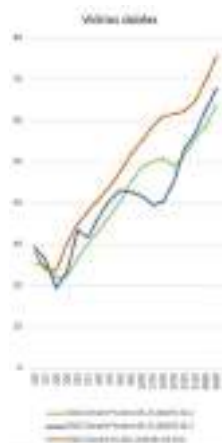


Figura 11. Gráfico vidrio dobles

2.8. Vidrios triples



Figura 12. Vidrio triple



Figura 13. Vidrio doble vs vidrio triple

En este caso, los vidrios triples no tienen un comportamiento acústico mejor que los dobles, por lo que su uso sólo se recomienda en el caso de que se necesite mejorar la eficiencia energética del mismo ya que en el resto de los casos implican un mayor coste, mayor peso y mayor espesor sin un aporte de aislamiento acústico mejor.

3. CONCLUSIONES

De todo el estudio realizado podemos resaltar las siguientes conclusiones:

- El vidrio laminar ofrece un mejor comportamiento que el vidrio monolítico.
- El uso de laminados con PVB acústico Silence mejoran la atenuación del vidrio
- La elección del triple acristalamiento no está justificada desde un punto de vista acústico ya que se alcanzan las mismas prestaciones con el doble acristalamiento. En este caso, el uso de triple acristalamiento sólo se recomienda desde el punto de vista de la eficiencia energética.
- La unión del vidrio con el marco y de el conjunto de la ventana a la parte ciega del edificio es crítica para



conseguir las prestaciones acústicas necesarias. Por ello, se debe prestar especial atención a la ejecución.

4. REFERENCIAS

[1] Base de datos Saint-Gobain de ensayos y simulaciones de vidrios ISACO



CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO NO INTERIOR E NA ENVOLVENTE DE CAMPOS DE PADEL – CASOS DE ESTUDO

Diogo Mateus^{1*}
Andreia Pereira¹

¹ ISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra

RESUMO

Com o crescente aumento da prática dos jogos de padel, e em muitos casos com a reconversão de campos de ténis para campos de padel, tem-se assistido a um aumento dos níveis de ruído no interior e na envolvente dos campos de jogos com consequente aumento de reclamações por parte da vizinhança destes campos. Este aumento de ruído é provocado essencialmente pela raquete de jogo, que no caso do padel é substancialmente mais rígida que a tradicional raquete de ténis, realçando muito mais a “pancada” entre a bola e a raquete. Para além do padel conduzir a maiores níveis de ruído que o ténis, a sua prática ocorre cada vez mais em espaços cobertos e com a delimitação dos campos com painéis de vidro, que conduz naturalmente a um aumento dos níveis de ruído no interior dos campos e em geral a um aumento do ruído na vizinhança dos campos.

Neste contexto, é apresentada neste trabalho uma caracterização acústica deste tipo particular de ruído, para diferentes coberturas em vários casos de estudo, e avaliado o desempenho de algumas soluções de minimização de ruído implementadas, nomeadamente a aplicação de revestimentos fonoabsorventes e a execução de barreiras acústicas.

ABSTRACT

With the growth in practice of padel games, and, in many cases, with the conversion of tennis to padel courts, there has been an increase in noise levels inside and in the vicinity of these playing fields, with consequent complaints from the neighbours. This increase in noise is essentially caused by the racket, which in the case of padel is substantially more rigid than the traditional tennis one, enhancing the stroke between the ball and the racket. Additionally, its practice usually takes place in enclosed spaces, with walls made of glass panels, a solution which leads to an increase in noise levels inside the courts and in, many cases, also to in the vicinity of the fields.

Within this context, this work presents an acoustic characterization of this particular type of noise, for different roofs used in courts, and evaluates the performance of some implemented noise mitigation solutions, namely the application of sound-absorbing coatings and implementation of noise barriers.

Palavras Chave — padel; cobertura; ruído; incomodidade; revestimento fonoabsorvente.

1. INTRODUÇÃO

A coexistência de habitações e outros recetores sensíveis ao ruído muito próximos de campos padel, tem vindo a originar nos últimos anos muitas reclamações por excesso de ruído. Apesar das semelhanças desta prática desportiva com o ténis, a raquete do padel é muito mais rígida e o ruído gerado pela “pancada” entre a raquete e a bola é muito mais intenso. Por outro lado, e com vista a melhorar o conforto dos jogadores, cada vez mais se opta pela aplicação de coberturas nos campos de padel. Apesar desta cobertura, juntamente com as habituais compartimentações verticais na envolvente de cada campo (com painéis de vidro), poder conduzir a algum efeito de atenuação, na propagação do ruído do interior dos campos para a sua vizinhança, em geral estes elementos são significativamente desfavoráveis. Com efeito, os componentes da cobertura e compartimentação conduzem a um aumento acentuado da reverberação no interior dos campos, que naturalmente se reflete no aumento de ruído e numa maior dificuldade do eventual controlo da propagação sonora.

A avaliação da incomodidade sonora gerada por esta prática desportiva pode ser avaliada, em Portugal, à semelhança doutras atividades potencialmente ruidosas, através de medições de ruído ambiente, tendo por base os requisitos indicados no Regulamento Geral do Ruído [1]. No caso de recintos desportivos fechados, e para o caso Português, aplicam-se ainda requisitos de limitação do tempo

* **Autor de contacto:** diogo@dec.uc.pt

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

de reverberação [2]. Contudo, como a generalidade dos campos de padel são parcialmente abertos, esta exigência é habitualmente cumprida com alguma margem.

No presente artigo são apresentados vários casos de estudo de campos de padel, uns abertos e outros parcialmente fechados (com coberturas rígidas ou em “tendas” flexíveis), onde se faz uma caracterização do ruído no interior e na envolvente destes campos e ainda uma avaliação da reverberação, no caso dos campos cobertos, com vista ao estudo de soluções de minimização de ruído, nomeadamente a aplicação de revestimentos de cobertura de elevada absorção sonora (aqui designados de fonoabsorventes) e a execução de barreiras acústicas. São ainda incluídos neste artigo resultados obtidos antes e após a implementação destas soluções de condicionamento acústico, que permitem uma avaliação do desempenho destas soluções.

2. REQUISITOS ACÚSTICOS APLICÁVEIS

A regulamentação existente em vigor em Portugal, no que respeita às condições acústicas, é apresentada no Regulamento Geral do Ruído (RGR) [1]. Este regulamento define, de uma forma global, uma política de prevenção e combate ao ruído, tendo em vista a salvaguarda da saúde e o bem estar das populações. Na vertente do condicionamento acústico nos edifícios, os requisitos aplicáveis, em Portugal, encontram-se descritos no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [2].

De acordo com o RGR [1], mais especificamente o seu artigo 13º, existem dois tipos distintos de exigências técnicas aplicáveis a atividades ruidosas e a fontes de ruído: a verificação do critério de incomodidade nos locais de ocupação sensível; e a verificação do critério de exposição máxima no exterior, de forma a não ultrapassar os limites de ruído previstos no artigo 11º do RGR. No caso dos campos de padel este segundo critério é geralmente cumprido, sendo condicionante o cumprimento do critério de incomodidade, em geral no interior dos espaços de ocupação sensível, nomeadamente habitações vizinhas (quando próximas). O cumprimento deste critério de incomodidade, passa por garantir que o valor de $L_{Ar} - L_{Aeq(rr)}$ não ultrapassa o limite ΔL , em que o L_{Ar} é o valor do nível sonoro equivalente medido durante o funcionamento da atividade, corrigido com as características tonais e/ou impulsivas deste ruído (de acordo com o anexo 1 do RGR), $L_{Aeq(rr)}$ é o nível sonoro equivalente residual existente na ausência de funcionamento da atividade em análise, e ΔL assume o valor de D , em função da duração acumulada de ocorrência do ruído particular, adicionado a 5dB(A) no período diurno, 4 dB(A) no período do entardecer e eventualmente 3dB(A) se a atividade também funcionar em período noturno (que não é habitual).

Acrescente-se, no entanto, que, de acordo com o n.º 5 do artigo 13º do RGR, o critério de incomodidade é cumprido automaticamente quando o valor de L_{Ar} é igual ou inferior a 27 dB(A), nos locais recetores no interior (ou eventualmente

igual ou inferior a 45 dB(A), para locais recetores no exterior).

De acordo como o RRAE [2], mais especificamente o artigo 9º, o tempo de reverberação, T , correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deve satisfazer a condição seguinte (em espaços sem sistema de difusão pública de mensagens sonoras), nas quais V se refere ao volume interior do recinto em causa:

$$T \leq 0.15V^{1/3} \quad (1)$$

3. CONDIÇÕES DE ENSAIO E LOCAIS DE MEDIÇÃO

No âmbito do presente trabalho foram realizadas medições acústica recorrendo ao seguinte equipamento principal: uma fonte de ruído aéreo omnidirecional (modelo Morset Sound); um analisador portátil (modelo Symphonie - 01dB-Stell, ligado a um PC portátil, com a aquisição e o tratamento através de software específico da “01dB-Stell”); e um sonómetro (modelo Solo Master da “01dB-Stell”).

Nos ensaios realizados foram utilizadas duas metodologias distintas: uma para avaliação do tempo de reverberação no interior dos campos, incluindo níveis sonoros dentro e fora dos campos, com uma fonte omnidirecional no centro dos campos, onde foi considerada como referência a norma ISO 3382-2:2008 [3]; e uma para avaliação do critério de incomodidade, cuja metodologia de ensaio foi baseada nas normas NP ISO 1996-1 e 2 [4,5] e no RGR [1].

Os locais de medição corresponderam a campos de jogos abertos (Figura 1, lado direito), campos de jogos com cobertura metálica (Figura 1, lado esquerdo) e campos fechados com solução de tenda com telas flexíveis (Figura 2). Na Figura 1 o campo mais afastado, aquando do registo da fotografia, já se encontrava com revestimento fonoabsorvente (na cor preta).



Figura 1. Imagem geral de 3 campos de padel cobertos (cobertura metálica autoportante) ao lado de outros 3 campos de padel descobertos (do lado direito).



Figura 2. Imagem geral do interior de “tenda”, envolvida por telas flexíveis, com 3 campos de padel no seu interior.

Na medição dos tempos de reverberação foram consideradas 2 posições de fonte próximo do centro de cada campo e 5 recetores distribuídos por cada campo (a distâncias entre 4 e 7 m da fonte). Nestas medições foi utilizado ruído de teste “codificado” em MLS (maximum length sequence), tendo sido considerados 2 decaimentos por cada ponto de medição. Na medição dos níveis sonoros foi utilizado um gerador de ruído branco e foram igualmente utilizadas as mesmas posições de fonte sonora.

4. RESULTADOS OBTIDOS E SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS

Nas secções seguintes deste ponto são apresentados os resultados mais relevantes da caracterização do ruído dentro e fora dos campos de jogo, dos tempos de reverberação no caso dos campos cobertos e a comparação de resultados (níveis de ruído e tempos de reverberação), antes e após a implementação de soluções de minimização de ruído. São também descritas de forma sumária as soluções implementadas. Estas soluções, aqui em estudo, foram implementadas apenas num dos casos de estudo e surgiram na sequência de ensaios de avaliação de incomodidade, onde se apurou que o critério de incomodidade regulamentar [1] não era cumprido, no período de entardecer (os campos em estudo funcionavam das 9h às 22 h).

4.1. Níveis de ruído

Na Figura 3 são apresentados os níveis de ruído “instantâneos” (valores de LAeq para intervalos consecutivos de 3 s), em dB(A), obtidos entre dois campos de padel descobertos (conforme Figura 1, do lado direito). Estes

resultados foram obtidos com estes dois campos a funcionarem em simultâneo, em condições de “funcionamento intenso”. Acrescente-se que a amplitude dos níveis de ruído acaba por depender bastante da intensidade de jogo e da força imposta na raquete de jogo. Na Figura 4 são apresentados dois espectros em frequência, em bandas de 1/3 de oitava e níveis em dB(A): um que corresponde o intervalo de medição da Figura 3 (campos abertos); e outro que corresponde a uma situação análoga, também com os dois campos adjacentes ao ponto de medição em “funcionamento intenso”, mas neste caso com campos cobertos (cobertura metálica autoportante, conforme Figura 1, do lado esquerdo, antes da aplicação de revestimento fonoabsorvente).

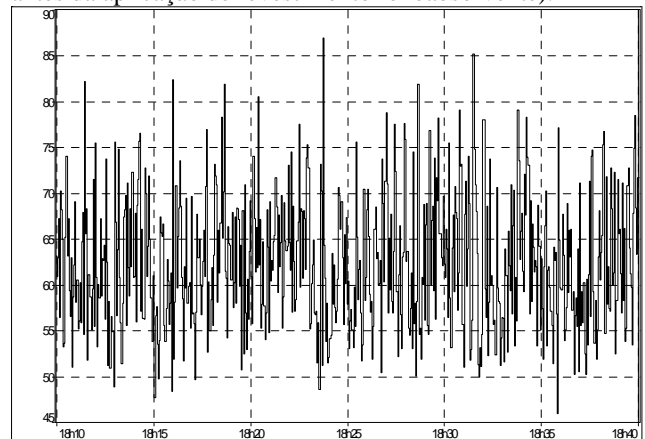


Figura 3. Níveis de ruído “instantâneos” (valores de LAeq para intervalos consecutivos de 3 s), em dB(A), obtidos entre dois campos de jogo sem cobertura.

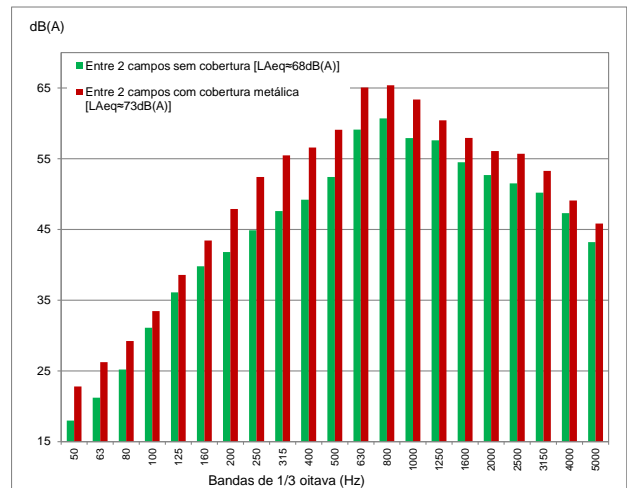


Figura 4. Espectros médios com o níveis de ruído no domínio da frequência e o respetivo valor de LAeq [em dB(A)], obtidos entre dois campos de jogo, com e sem cobertura.

Como referido, os resultados apresentados correspondem a situações desfavoráveis de jogo, com valores médios de

LAeq entre campos de jogo da ordem de 70 dB(A), mais especificamente 68 dB(A) no caso dos campos sem cobertura e 73 dB(A) nos campos com cobertura metálica. Apesar de não ser possível uma repetição perfeita das condições de emissão nestes dois cenários, é possível verificar que a cobertura é bastante penalizadora, no aumento dos níveis de ruído no interior e na vizinhança dos campos de jogo. Acrescente-se que foram também realizadas medições em condições de “menor intensidade” de jogo, com valores de LAeq, para intervalos superiores a 10 minutos, até cerca de 5 dB(A) abaixo dos indicados. Para todos eles, em termos de espectro, verifica-se que existe uma forte componente entre os 500 e os 2000 Hz, com valores máximos nas bandas de 1/3 de oitava de 630 e 800 Hz.

4.2. Tempo de reverberação (nos campos cobertos)

Na Figura 5 são apresentados os tempos de reverberação médios (T20), incluindo o valor médio T nas oitavas de 500, 1000 e 2000 Hz, obtidos no interior dos campos de padel cobertos, para os dois tipos de coberturas avaliadas: com 3 campos de padel adjacentes de cobertura metálica autoportante (conforme Figura 1); e outros 3 campos no interior de tenda (conforme Figura 2).

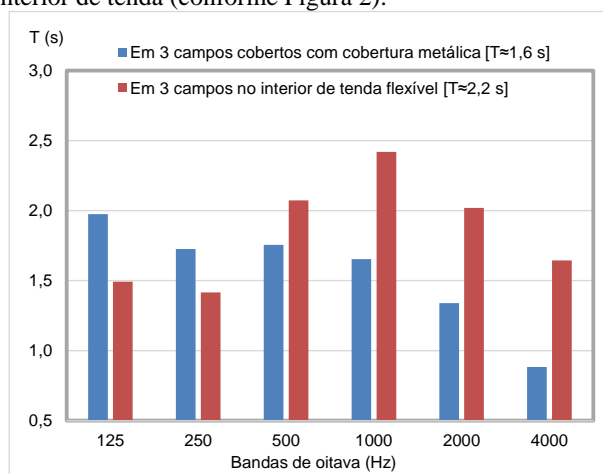


Figura 5. Valores médios dos tempos de reverberação (T20 e T), em bandas de oitava e o valor global resultante da média das oitavas de 500, 1000 e 2000 Hz, com os dois tipos de coberturas avaliadas.

Da análise dos resultados obtidos é possível verificar que ambas as situações cumprem os limites regulamentares do tempo de reverberação T [2], cujos limites correspondem a 2.6 s, no conjunto dos 3 campos com cobertura metálica, e a 2.9 s, no caso da tenda com os outros 3 campos. Efetivamente já se esperava este cumprimento, uma vez que existiam grandes áreas laterais abertas em ambas as situações. Na cobertura metálica (com toda a envolvente vertical aberta) a maior reverberação ocorre em baixas frequências, enquanto

que na tenda (com telas flexíveis na cobertura e grande parte da envolvente vertical) a maior reverberação ocorre entre as bandas de oitava de 500 e 2000 Hz, que coincide com a gama de frequências onde a emissão sonora do jogo de padel é maior.

4.3. Soluções implementadas

Face aos resultados obtidos, quer os aqui apresentados, quer outros relativos ao ruído ambiente medido em recetores sensíveis vizinhos (não apresentados no âmbito deste artigo), foram propostos dois tipos de soluções de minimização de ruído: barreiras acústicas nos limites de propriedade dos dois complexos desportivos, quando existiam habitações próximas; e aplicação de revestimento fonoabsorvente no caso da cobertura metálica. Em ambos os casos as barreiras acústicas propostas eram verticais, com cerca de 4 m de altura. O revestimento fonoabsorvente aplicado na cobertura metálica é construído por placas de 1x1 m² de aglomerado de espuma de poliuretano flexível (tingido de preto), com massa volúmica próxima de 80 kg/m³, coladas diretamente à face inferior das chapas de cobertura. Como as chapas são autoportantes com grandes nervuras e de dimensão variável, a caixa de ar sobre os painéis de revestimento aplicados ficou com dimensões variáveis, sensivelmente entre 0 e 30 cm, permitindo assim uma absorção de “banda larga” em frequência.

Nos campos em tenda também seria desejável a redução dos tempos de reverberação, por exemplo, através da aplicação de “baffles acústicos” suspensos nas estruturas de suporte das telas da envolvente, mas a sua eficácia seria reduzida, face à pequena área que seria viável aplicar. Após a execução das barreiras acústicas e do revestimento fonoabsorvente na cobertura metálica foram repetidos os ensaios acústicos. Neste artigo são apresentados, na secção seguinte, alguns desses resultados, tendo sido selecionados apenas resultados obtidos dentro de um dos clubes desportivos, que dependeram essencialmente das características de absorção da cobertura.

4.4. Comparação de níveis de ruído e tempos de reverberação antes e após intervenção

Nesta secção é feita a comparação de resultados antes e após a implementação das soluções de minimização de ruído, que para os pontos de medição aqui apresentados, dependeu essencialmente do revestimento de cobertura. Uma vez que a fonte de ruído real (jogo de padel) não permite uma repetição perfeita, para os diferentes cenários analisados, os resultados aqui apresentados foram obtidos com uma fonte de ruído com emissão quase constante (fonte omnidirecional) localizada em dois pontos centrais de cada campo de jogo e com 5 recetores distribuídos por cada campo de jogo em análise.

Na Figura 6 são novamente apresentados resultados médios do tempo de reverberação, medidos num dos campos

com cobertura metálica, antes da intervenção, juntamente com os resultados obtidos após intervenção. Como se pode verificar, com a aplicação do revestimento fonoabsorvente foi possível reduzir substancialmente os tempos de reverberação em todo o espectro (em termos globais uma redução do valor de T de 1.6 s para 0.9 s).

Na Figura 7 são apresentados valores médios dos níveis sonoros registados no interior de um dos campos de padel cobertos (espectros no domínio da frequência, em bandas de 1/3 de oitava, e o respetivo valor global de LAeq, em dB(A)), antes e após intervenção na cobertura, quando a fonte de ruído omnidirecional se encontrava na zona central do campo de jogo (com 2 posições de fonte e 5 recetores). Nesta Figura é ainda acrescentado o espectro médio dos níveis sonoros obtido em condições semelhantes de fonte-recetor, mas localizados num dos campos sem cobertura. Na Figura 8, com vista a avaliar a redução do ruído transmitido para fora dos campos de padel, após a implementação do revestimento nas coberturas, são apresentados dois espectro médios registados num recetor exterior a 10 m do limite de campo coberto (com fonte na zona central do campo coberto), antes e após intervenção.

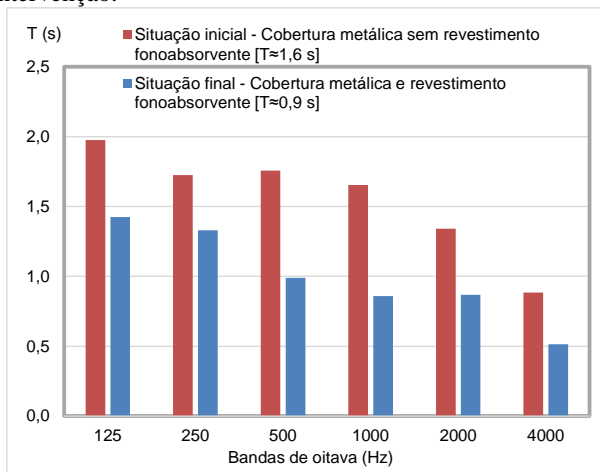


Figura 6. Valores médios dos tempos de reverberação (T20 e T), antes e depois da aplicação de revestimento fonoabsorvente nas coberturas metálicas, sobre 3 campos de padel.

Da análise das Figuras 7 e 8 é possível verificar que a aplicação de revestimento fonoabsorvente permitiu uma redução bastante significativa de ruído, com uma redução no valor de LAeq próxima de 4 dB(A), dentro do campo coberto, e da ordem de 10 dB(A), num recetor exterior a 10 m do limite do campo. Este valor de 10 dB(A) parece exagerado, mas está relacionado com o facto dos campos serem delimitados (do lado do recetor) com painéis de vidro com 3 m de altura, e neste caso a contribuição das reflexões da cobertura constitui a principal “caminho” de transmissão. Para pontos mais afastados e sobretudo para pontos laterais aos campos, onde não existem os painéis de vidro, a redução

é bastante inferior. Por exemplo, num recetor sensível situado no exterior a cerca de 50 m do limite do campo mais próximo a redução foi próxima de 4 dB(A).

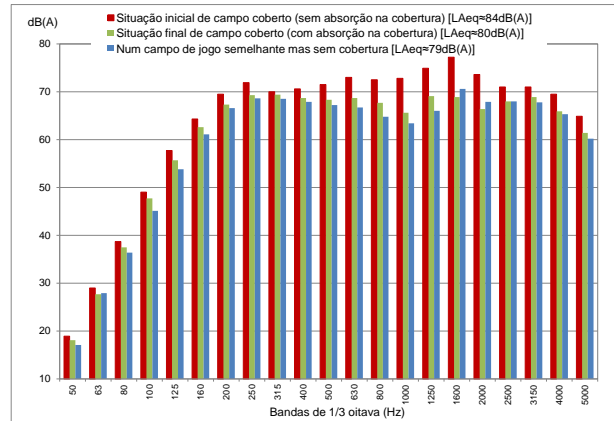


Figura 7. Espectros médios com os níveis sonoros no domínio da frequência e o respetivo valor de LAeq [em dB(A)], obtidos no interior de um campo de jogo coberto, antes e após intervenção, e num outro campo sem cobertura.

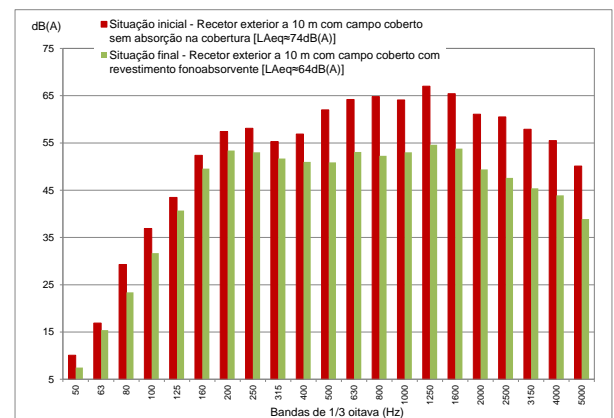


Figura 8. Espectros médios com os níveis sonoros no domínio da frequência e o respetivo valor de LAeq [em dB(A)], obtidos num recetor exterior a 10 m do limite do campo coberto, antes e após intervenção na cobertura.

Na Figura 9 são apresentados os níveis de ruído “instantâneos” (valores de LAeq para intervalos consecutivos de 3 s), em dB(A), obtidos no referido recetor sensível, situado a cerca de 50 m, mas neste caso com jogo “real” a decorrer nos 3 campos cobertos. Trata-se de uma medição em contínuo realizada entre as 17:50 e as 20:40h, sem jogos nos campos de padel antes das 18h e após as 20h. Entre as 18 e as 20 horas estiveram sempre a decorrer jogos em simultâneo nos 3 campos de padel cobertos. Na Figura 10 são apresentados os correspondentes espectros médios no domínio da frequência, em bandas de 1/3 de oitava: um com

“Ruído Particular”, obtido das 18h às 20h; e outro “Sem Ruído Particular”, obtido das 20h às 20:40h. Em termos globais, o valor de LAeq durante os jogos foi próximo de 51.2 dB(A), enquanto que na sua ausência baixou para cerca de 49.5 dB(A). Ou seja, o acréscimo foi próximo de 2 dB(A) (ou mais especificamente 1.7 dB(A)). Não se registaram componentes tonais nem impulsivas no ruído particular em análise.

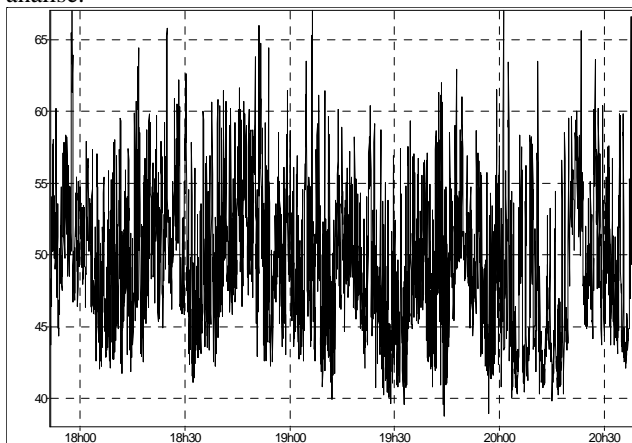


Figura 9. Níveis de ruído “instantâneos” (valores de LAeq para intervalos consecutivos de 3 s), em dB(A), obtidos num recetor sensível a cerca de 50 m do limite dos campos cobertos.

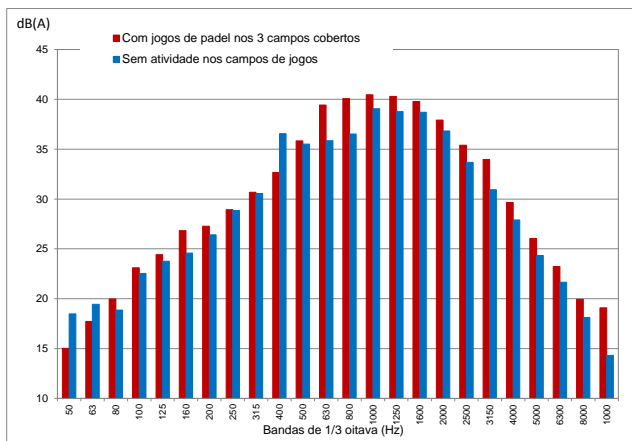


Figura 10. Espectros médios com os níveis sonoros no domínio da frequência e o respetivo valor de LAeq [em dB(A)], obtidos num recetor sensível a cerca de 50 m do limite dos campos cobertos, com e sem “Ruído Particular”.

Da análise da Figura 9 é possível verificar que a variação nos níveis sonoros ao longo das quase 3 horas de medição é pequena. Com o arranque dos jogos às 18h a variação é impercetível. Com o encerramento dos jogos às 20h verifica-se alguma variação, mas pouco acentuada. Da análise da Figura 10 verifica-se que o maior impacto do ruído de padel ocorre entre as bandas de frequência de 500 Hz e 2000 Hz,

como seria de esperar, uma vez que é também nesta gama de frequências que ocorrem maiores amplitudes nos níveis sonoros junto dos campos de padel. Pontualmente até se verificam níveis de ruído mais elevados na situação sem atividade nos campos de jogos, mas isto estará relacionado com o facto do ruído residual apresentar uma variabilidade significativa ao longo do tempo. Em termos globais, os resultados permitem verificar que, à partida, a situação de incomodidade anteriormente detetada no recetor sensível em estudo foi ultrapassada.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentada uma síntese de vários trabalhos de condicionamento acústico e de controlo de ruído efetuados em campos de padel, abrangendo campos sem cobertura, em geral menos problemáticos, e campos cobertos, onde geralmente a cobertura constitui uma agravante. Apesar deste desporto se considerar habitualmente “não ruidoso”, na realidade o tipo de raquete utilizada e a proximidade com recetores sensíveis pode conduzir a situações de significativa incomodidade sonora. No caso dos campos cobertos, com delimitações dos campos em vidro e coberturas de baixa absorção sonora, o controlo do ruído passa a ser mais complicado, e soluções de barreiras acústicas fonoabsorventes nos limites dos complexos desportivos podem não ser suficientes. Num dos casos de estudo detalhado neste artigo a solução de barreira acústica teve de ser complementada com o revestimento fonoabsorvente em toda a cobertura, para conseguir uma franca redução do ruído na envolvente dos campos de padel. No caso de campos em tendas flexíveis, como num dos casos aqui apresentado, a aplicação de absorção sonora ao nível das coberturas, por exemplo através de “baffles acústicos”, geralmente só é viável com áreas de absorção sonora reduzidas, o que não resolve o problema.

6. REFERENCIAS

- [1] RGR (2007): *Regulamento Geral do Ruído*, aprovado pelo Decreto-Lei nº 9/2007 de 17/01, 2007.
- [2] RRAE (2008): *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002 de 11/05, com a nova redação dada pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06, 2008.
- [3] ISO 3382-2: *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*, Standard. ISO, Geneva, Switzerland, 2008.
- [4] NP ISO 1996-1: *Acústica. Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente. Parte 1: Grandezas fundamentais e métodos de avaliação*. Normas IPQ, Portugal 2019.
- [5] NP ISO 1996-2: *Acústica. Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente. Parte 2: Determinação dos níveis de pressão sonora*. Normas IPQ, Portugal 2019.



AVALIAÇÃO DO ISOLAMENTO ACÚSTICO DE DIVISÓRIAS COMPOSTAS POR PAINÉIS DE AGLOMERADO DE MADEIRA

Andreia Pereira^{1*}
Diogo Mateus²
Luís Godinho³
Oswaldo Gomes⁴

^{1,2,3} ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal

⁴ FINSA, Est. Nacional 234, Km 92.7, 3524-952 Nelas, Viseu, Portugal

RESUMO

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento na procura de soluções e sistemas construtivos mais sustentáveis, mais leves e de “construção seca”, como é o caso dos sistemas em que se utilizam painéis de aglomerado de madeira.

Tratando-se de painéis maciços, utilizados em elementos de compartimentação vertical, com massa relativamente reduzida, quando comparada com a massa das soluções tradicionais (paredes de alvenaria), o isolamento acústico é, geralmente bastante limitado. Para situações onde se pretende atingir um desempenho acústico superior, a utilização deste sistema construtivo tem de ser complementada, por exemplo, através da adoção de estruturas de montante duplo e/ou com elementos de reforço de isolamento acústico. Neste contexto, são estudados neste trabalho um conjunto de soluções de compartimentação vertical, tendo por base o aglomerado de madeira. Pretende-se caracterizar o seu desempenho através de ensaios em laboratório e através de um modelo de simulação.

ABSTRACT

In recent years there has been an increase in the demand for more sustainable, lighter and "dry construction" solutions and construction systems, such as those in which wood board panels are used.

In the case of panels, used as vertical partitions, with relatively reduced mass, when compared to the mass of traditional solutions (masonry walls), the sound insulation is

usually quite low. For situations where it is intended to achieve a higher acoustic performance, the use of this construction system has to be complemented, for example, through the employment of double support structures and / or with acoustic insulation reinforcement elements. In this context, a set of vertical partitions are studied in this work, making use of wood boards. In this context, an experimental campaign performed in laboratory, as well as simulations, are carried out to characterize their performance.

Palavras Chave— Redução sonora, divisórias leves, aglomerado de madeira, barrotes de madeira, experimental, analítico.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, alternativas aos métodos construtivos tradicionais pesados (betão e alvenaria) utilizados em Portugal, têm vindo a emergir e a proliferar, designadamente os sistemas leves. O sistema construtivo de madeira, embora seja um sistema tradicional de construção, que nas últimas décadas caiu em desuso, é um exemplo desta crescente tendência de utilização. A utilização da madeira como material de construção renovável, capaz de armazenar CO₂ e com desempenho estrutural semelhante ao betão e aço, para alguns tipos de construção, tornam este material interessante na perspetiva da construção sustentável. Como aqueles ainda são os principais materiais utilizados na construção atualmente, e o setor da construção é um dos maiores contribuintes para a pegada de carbono global, sendo responsável por quase 40% das emissões anuais de GEE

* *Autor de contacto:* apereira@dec.uc.pt

Copyright: ©2023 Pereira et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

(gases de efeito estufa), 40 % do consumo global de recursos, 40% do uso de energia e 50% dos resíduos globais [1], a madeira é um material alternativo valioso [2]. A utilização de madeira (em condições de silvicultura responsável), por ser um sumidouro natural de carbono, poderá permitir ao setor da construção evitar as emissões substanciais de GEE associadas à utilização insustentável de materiais.

No caso das paredes em madeira, estas são constituídas por uma estrutura composta por barrotes de madeira (normalmente pinho), que é revestida por painéis leves (geralmente painéis de aglomerado de madeira, gesso cartonado, OSB ou placas cimentícias), sendo a caixa de ar preenchida com material absorvente, quando existem requisitos térmicos e/ou acústicos. Devido à sua massa reduzida e à conexão rígida entre o painel interior e exterior, estes elementos possuem, geralmente, um isolamento acústico reduzido.

Uma das técnicas mais eficazes para melhorar o seu desempenho acústico consiste em adicionar painéis, aumentando desta forma a massa do sistema. A estrutura de suporte em madeira pode prejudicar também o seu desempenho, pois a presença dos barrotes onde os painéis são fixos, geralmente de forma rígida (por aparafusamento), cria um caminho de transmissão de vibrações entre o painel exterior e o interior da parede, que pode ser mais crítico do que a transmissão que ocorre através da zona entre estes elementos. Uma solução possível para diminuir a “ponte acústica” que aí se forma, consiste em utilizar duas estruturas de perfis de barrotes, ao invés de uma, desacopladas, quebrando o caminho de transmissão de vibrações através dos perfis. Esta solução será analisada neste trabalho.

Ao longo da literatura sobre o desempenho acústico de sistemas de construção leves, as paredes de madeira são geralmente tratadas como paredes duplas. A transmissão sonora de paredes duplas em madeira foi investigada e descrita ao longo das últimas décadas. Uma revisão bibliográfica de modelos de transmissão sonora de paredes duplas com ligações entre o interior e o painel externo pode ser encontrada em [3], [4]. Além disso, Hongisto apresentou uma avaliação dos métodos simplificados mais referenciados de transmissão sonora fornecida por paredes duplas [5]. Este trabalho demonstrou que existe uma grande discrepância entre os resultados dados pelos diferentes métodos e apenas cinco dos dezassete modelos considerados podem lidar com as ligações entre painéis. Um destes modelos foi apresentado por Sharp em 1978 [6], sendo atualmente muito utilizado na perda de transmissão sonora de elementos leves de construção.

A influência de vários parâmetros no isolamento sonoro de paredes duplas leves tem sido estudada por diferentes investigadores através de medições. Foram realizados vários estudos paramétricos, focando no efeito dos perfis, incluindo a sua dimensão, espaçamento, geometria e material absorvente existente no espaço de ar. Um relatório fornecido pela Warnock [7] apresenta várias medições e estimativas da

classe de transmissão sonora (STC) para uma grande variedade de paredes duplas de em aço leve interior e exterior. De acordo com a literatura, o número e o tipo de perfis de aço, bem como a distância entre eles, são fatores que influenciam o desempenho do isolamento sonoro de uma parede dupla leve.

Recentemente, alguns programas de computador baseados em teorias científicas foram disponibilizados permitindo prever a perda de transmissão sonora fornecida por estruturas multicamadas, como o software INSUL [8,9,10]. Kurra [9] realizou uma comparação de algumas ferramentas computacionais, incluindo o software INSUL [8] que investiga as diferenças e semelhanças dos resultados obtidos através de um estudo de amostragem. Este trabalho apresenta também uma comparação entre os dados calculados e medidos, nos quais o INSUL demonstrou uma melhor correlação com os resultados experimentais.

Neste trabalho, é avaliado, experimentalmente em laboratório e através de um modelo de simulação, utilizando o software INSUL, o isolamento acústico de um conjunto de soluções construtivas de divisórias leves, compostas por uma estrutura de barrotes de madeira revestida por painéis de aglomerado de madeira, onde se avalia a influência da espessura da caixa de ar, presença de lã mineral, número de placas e sua ligação à estrutura de suporte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho é avaliado o desempenho acústico de paredes divisórias, em aglomerado de madeira. Alguns aspetos importantes que poderão condicionar o desempenho acústico destas soluções consistem em: espessura da caixa-da-ar, presença de material absorvente podendo preencher total ou parcialmente a caixa de ar e tipo de ligações que são utilizadas para acoplar o aglomerado de madeira à estrutura de suporte. Estes aspetos são analisados neste trabalho. A Figura 1 ilustra a secção transversal das diferentes paredes leves que foram testadas, onde é possível identificar os diversos materiais utilizados e as condições de montagem.

A parede designada por Parede 1 será a parede de referência e foi utilizada para averiguar a possibilidade de aumentar o desempenho acústico.

Os testes experimentais foram conduzidos no laboratório de acústica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, que dispõe de duas câmaras acústicas adjacentes que cumprem com os requisitos da série de normas EN ISO 10140 [11]. As paredes testadas foram introduzidas entre as câmaras acústicas, conforme se observa na Figura 2. O volume da câmara emissora é de 111 m³ e o da câmara recetora de 122 m³. As paredes das câmaras são em betão, garantindo-se que as paredes opostas não são paralelas, de modo a evitar a geração de campos estacionários dentro de cada uma das câmaras. Estes compartimentos encontram-se separados entre si de modo a minimizar a transmissão por via marginal e a garantir um elevado

isolamento acústico entre eles. As paredes testadas, têm dimensões de 1.25m x 1.50m, tendo sido montadas numa parede de suporte com 10 m², com um desempenho acústico esperado, R_w superior a 62 dB.

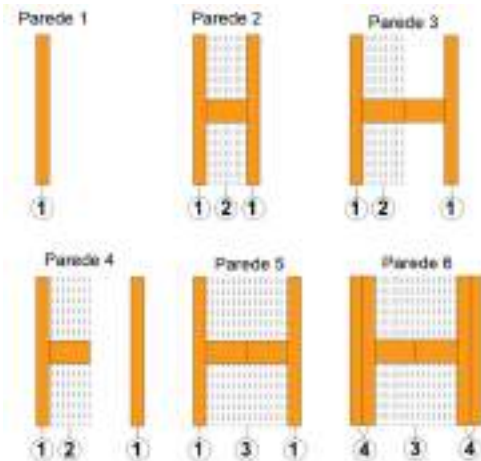


Figura 1. Seção transversal das seis paredes ensaiadas, onde se ilustra esquematicamente as condições de montagem. Materiais: 1 – Uma placa de aglomerado de madeira (15 mm) aparafusado ao barrote de madeira com 50 mm de espessura; 2 - Uma placa de lã mineral (40 kg/m³) com 50 mm de espessura; 3 – Duas placas de lã mineral (40 kg/m³) com 50 mm de espessura; 4 – Duas placas de aglomerado de madeira (15 mm) aparafusadas ao barrote de madeira.

A Figura 2 apresenta ainda a cadeia de medição utilizada, indicando as posições de medição e de fonte sonora. As medições foram efetuadas utilizando dois microfones (Bruel & Kjaer, modelo 4155, e GRAS – Sound & Vibration, model 40AF), com os respetivos pré-amplificadores, e um sistema de aquisição de sinal (Symphonie da 01dB). Para a fonte de ruído foi utilizada uma fonte omnidirecional, composta por 12 altifalantes (Modelo DO12 da 01dB), e um amplificador e gerador de sinal (Modelos 700 e RC-10 da 01dB). As medições foram efetuadas nas câmaras acústicas, de acordo com os procedimentos de medição definidos na série de normas ISO 10140, com a fonte posicionada em duas posições diferentes na câmara emissora e em 5 posições de microfone em cada uma das câmaras acústicas. Para medição do tempo de reverberação na câmara recetora foram utilizadas 2 posições de fonte e 3 pontos recetores, com 2 decaimentos por ponto.

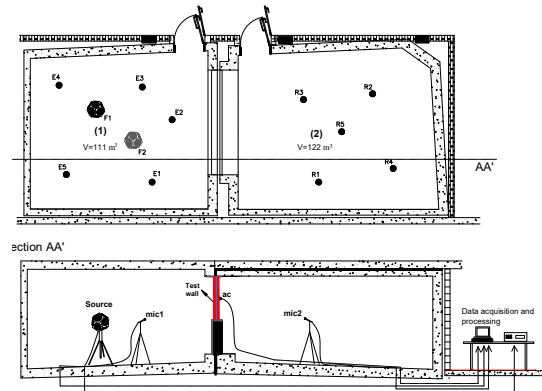


Figura 2. Esquema das câmaras acústicas ilustrando as posições de fonte, recetores e sistema de aquisição de sinal.

Na Figura 3 apresentam-se algumas imagens dos ensaios realizados.



Figura 3. Imagens de alguns dos ensaios realizados.

Para os casos representados na Figura 1, foi ainda efetuada a simulação, utilizando o software INSUL [8], do modo a poder melhor compreender alguns dos resultados obtidos experimentalmente. As simulações foram efetuadas assumindo que todos os materiais são isotrópicos, com exceção da lã mineral, existente na caixa de ar, formada pela estrutura de barrote de madeira, que foi simulada como um absorvente através da definição da resistividade ao fluxo. As propriedades dos materiais utilizadas encontram-se na Tabela 1. O espaçamento entre barrote considerado foi de 600mm.

Tabela 1: Propriedades dos materiais utilizados no software INSUL.

Material	Resistividade ao fluxo [Rayl/m]	E [GPa]	Densidade [kg/m ³]	Amort. Interno
Aglom. de madeira	-	3.272	700	0.02
Lã mineral	20 000	-	40	-

3. RESULTADOS

3.1. Parede 1

Na Figura 4 encontra-se a curva de redução sonora obtida experimentalmente para a Parede 1, representada na Figura 1. Nesta figura foi ainda incluído o resultado teórico. Através da análise destes resultados, verifica-se que o painel de referência, designado por Parede 1, apresenta um índice de redução sonora de $R_w=27$ dB, para a curva resultante do ensaio e um índice de $R_w=28$ dB para a curva teórica. Se adicionarmos os termos de adaptação (C e Ctr), o desempenho acústico será idêntico em ambos os casos. Observando ambas as curvas, verificamos que são próximas sendo possível identificar uma quebra na banda de frequência de 2000 Hz, associada à frequência crítica do painel. No caso da curva resultante do ensaio verifica-se ainda, na banda de frequência de 125 Hz, uma ligeira quebra relacionada com um modo de vibração do painel com 1.88 m^2 e que não é previsto pela curva teórica.

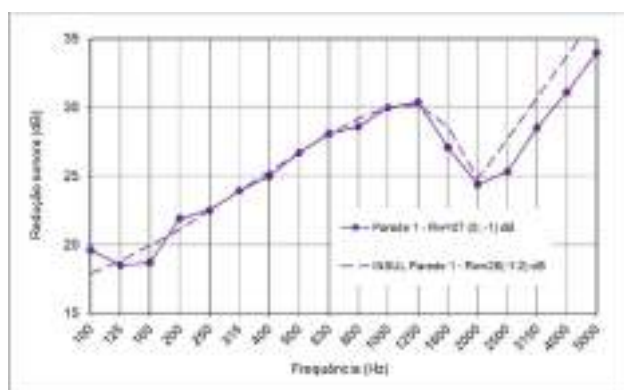


Figura 3. Curva de redução sonora referente à parede 1 resultante do ensaio e da previsão.

3.2. Paredes 2 e 3

Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos para as Parede 2 e 3. A Parede 2 corresponde a uma divisória com painel duplo suportado por uma estrutura de barrotes de madeira acoplada, com secção transversal 30x50mm, sendo a caixa de ar de 50mm totalmente preenchida por lã mineral. No que concerne à Parede 3, esta é semelhante à Parede 2, no entanto, foi duplicada a caixa de ar, apresentando esta uma espessura de 100mm (ver Figura 1).

Relativamente à Parede 2, analisando o resultado experimental e o teórico, as curvas aproximam-se, prevendo ambas uma quebra na frequência crítica do painel com 15 mm e na frequência de ressonância do conjunto.

Comparando os resultados experimentais obtidos para as duas paredes, verifica-se um aumento no valor do índice de isolamento de 3 dB quando se duplica a caixa de ar, sendo o ganho visível em toda a gama de frequência. Analisando os resultados teóricos verifica-se um aumento de apenas 1 dB com a duplicação da caixa de ar, um resultado que se revela muito conservativo relativamente ao expectável.

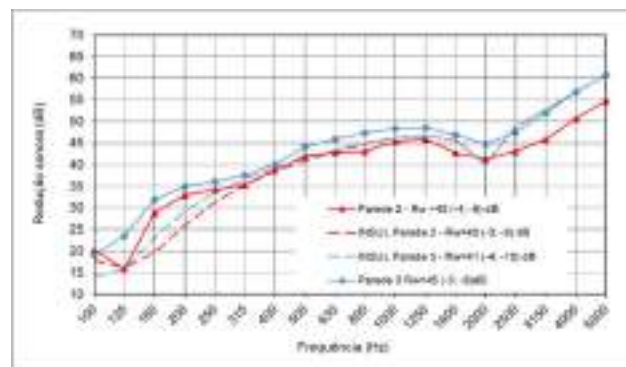


Figura 4. Curva de redução sonora referente à Parede 2 e 3 resultante do ensaio e da previsão.

3.2. Paredes 3 e 4

Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos para as Parede 3 e 4. A Parede 3 corresponde a uma divisória com painel duplo suportado por uma estrutura de barrotes de madeira acoplada, com secção transversal 30x100mm, sendo a caixa de ar preenchida por lã mineral com 50 mm. No que concerne à Parede 4, esta tem uma caixa de ar e lã mineral com espessuras semelhantes à da Parede 3, no entanto, foi utilizada uma estrutura de barrotes de madeira, com secção transversal 50x50mm, encontrando-se o segundo painel desacoplado da estrutura de suporte. É espectável que a transmissão sonora através dos elementos de apoio diminua, se este caminho de transmissão for removido. Nesta figura estão ainda incluídos os resultados obtidos a partir do software INSUL.

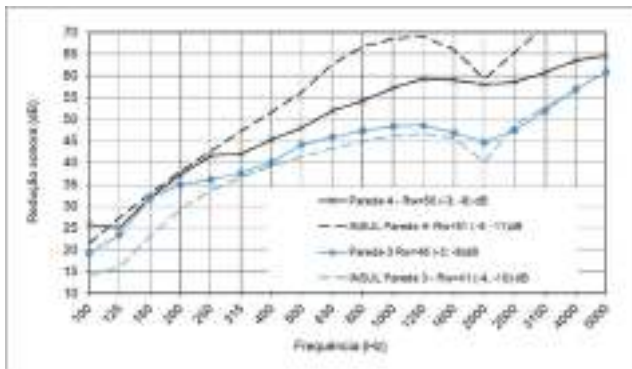


Figura 4. Curva de redução sonora referente à Parede 3 e 4 resultante do ensaio e da previsão.

Verifica-se que a Parede 3 apresenta um valor de $R_w=45$ dB, e termos de adaptação C; Ctr respectivamente de -3 e -8 dB. Comparando o desempenho da Parede 4 relativamente à Parede 3, verifica-se um aumento de 5 dB no valor do índice, com o desacoplamento do segundo painel da estrutura de suporte, ocorrendo também um ganho significativo, ao longo da gama de frequências em análise, sobretudo a partir dos 200 Hz.

No caso da Parede 4, o resultado teórico, apresenta um índice muito próximo do resultado experimental, embora em frequência se verifique uma diferença significativa nas médias e altas frequências.

3.3. Paredes 3 e 5

A Figura 5 apresenta as curvas de redução sonora para a parede considerando painel duplo com caixa de ar de 100mm e estrutura de suporte acoplada. No caso da Parede 3, esta encontra-se parcialmente preenchida com lã mineral, de 50 mm, enquanto a Parede 5 está totalmente preenchida com este material.

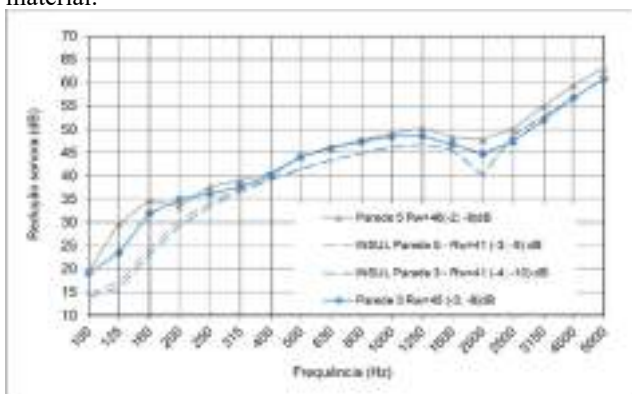


Figura 5. Curva de redução sonora referente à Parede 4 e 5 resultante do ensaio.

Quando a caixa de ar se encontra totalmente preenchida com lã mineral observa-se um ligeiro aumento no índice de 1 dB, em relação ao resultado obtido pela Parede 3, bem como

ocorre um ligeiro ganho ao longo de todo o intervalo de frequências analisado. Já o modelo teórico prevê apenas um ligeiro aumento no desempenho, na baixa frequência, não se verificando diferenças no valor do índice.

3.4. Paredes 5 e 6

Na Figura 6 apresentam-se as curvas de redução sonora referentes à Parede 6, apresentando dois painéis acoplados de cada lado da estrutura de suporte acoplada, duplicando desta forma a massa em relação à Parede 5. A partir dos resultados do ensaio verifica-se um aumento de 4 dB, no índice, com um valor de $R_w=50$ dB. De referir ainda que o termo de adaptação Ctr indica uma melhoria nas baixas frequências. Já os valores da simulação apresentam-se ligeiramente diferentes dos resultados de ensaio obtidos com um índice final de $R_w=48$ dB, embora na baixa frequência as diferenças sejam maiores.

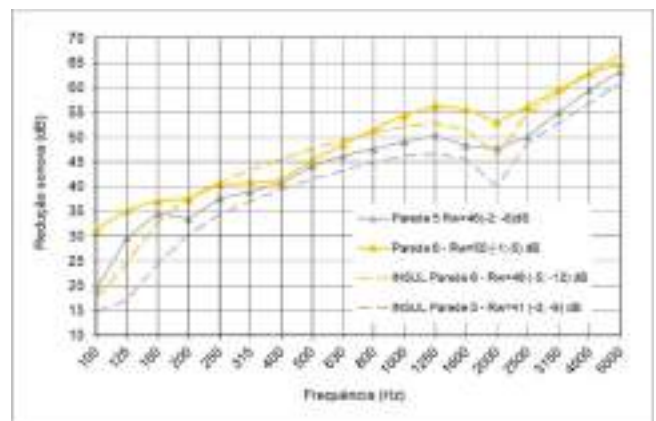


Figura 6. Curva de redução sonora referente às Paredes 5 e 6 resultante do ensaio.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado, experimentalmente, em laboratório e através de um modelo teórico, o isolamento acústico de um conjunto de soluções construtivas de divisórias leves, com estrutura composta por barrotes de madeira revestida por painéis de aglomerado de madeira. Analisou-se a influência da espessura da caixa de ar, preenchimento com lã mineral, número de placas e sua ligação à estrutura de suporte. A partir dos resultados de ensaio tiraram-se as seguintes conclusões: no que concerne à divisória composta por painel duplo suportado rigidamente por uma estrutura de barrotes de madeira, todos os resultados obtidos situaram-se entre 42 e 46 dB; a duplicação da caixa de ar de 50mm para 100 mm permitiu obter um aumento de 3dB, sendo o ganho visível em toda a gama de frequência; o preenchimento total da caixa de ar com lã mineral relativamente ao preenchimento parcial conferiu um ganho de 1 dB; a duplicação dos painéis de cada lado da estrutura de suporte possibilitou a obtenção de um índice de redução

sonora de 50 dB (mais 4 dB) com melhoria de desempenho nas baixas frequências; um valor de $R_w = 50$ dB foi igualmente obtido quando se desacoplou um dos painéis da divisória composta por painel duplo (mantendo a espessura da caixa de ar), verificando-se um aumento de 5 dB no R_w . Relativamente aos resultados do modelo analítico, estes sempre são conducentes a valores de isolamento mais baixos, nem sempre prevendo o aumento de desempenho esperado, designadamente quando se altera espessura da caixa de ar destes elementos.

- [10] E. Roque, P. Santos, A. Pereira, Thermal and sound insulation of lightweight steel framed façade walls, *Science and Technology for the Built Environment*, 25:2, 156-176, (2019) DOI: 10.1080/23744731.2018.1506677
- [11] Standards ISO 10140 (2010). Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio facultado pela empresa FINSA, pelo programa Erasmus Mundus WAVES e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia - FCT - no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-032061.

6. REFERÊNCIAS

- [1] United Nations. "Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers"; United Nations: New York, NY, USA, 2009; pp. 1-62.
- [2] Ramage, M.H.; Burrige, H.; Busse-Wicher, M.; Fereday, G.; Reynolds, T.; Shah, D.U.; Wu, G.; Yu, L.; Fleming, P.; Densley-Tingley, D.; et al. "The Wood from the Trees: The Use of Timber in Construction" *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017,68, 333-359.
- [3] J. Poblet-Puig, A. Rodríguez-Ferran. "The role of studs in the sound transmission of double walls". *Acta Acust. United Acust.*, 45, pp. 555-567 (2009).
- [4] S. Paul, G. F. Radavelli and A. R. da Silva. "Experimental evaluation of sound insulation of light steel frame façades that use horizontal inter-stud stiffeners and different lining materials". *Build. Environ.*, 94, pp. 829-839 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.010>
- [5] V. Hongisto. "Sound insulation of double panels-comparison of existing prediction models" *Acta Acust. United Acust.*, 92, pp. 61-78 (2006).
- [6] B. H. Sharp. "Prediction Methods for Sound Transmission of Buildings Elements". *Noise Con. Eng. J.*, 11, pp. 53-63 (1978).
- [7] A. Warnock. "Estimation of Sound Transmission Class and Impact Insulation Class Rating for Steel Framed Assemblies", Tech. Rep., National Research Council Canada (2008).
- [8] INSUL. Software Version 8.0.12. Available online: <https://www.insul.co.nz/> (accessed on 11 April 2017).
- [9] S. Kurra. "Comparison of the models for predicting sound insulation values of multilayered building elements". *Appl. Acoust.*, 73, pp. 575-589 (2012). doi:10.1016/j.apacoust.2011.11.008

VARIABILIDADE DE DESEMPENHO *IN SITU* DE PORTAS ACÚSTICAS E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS E ESTIMATIVAS TEÓRICAS

Rui Miguel de Sousa Lima e Sá Ribeiro^{1*}

Isabel Cardoso, Tiago Brilhante, Francisco Vieira, Pedro Pinto, Clara Cardoso

¹Amplitude Acoustics - Acústica e Vibração, Lda. – Portugal

RESUMO

É reconhecida a fragilidade a sons de condução aérea das portas de acesso a unidades alojamento (privativas ou turísticas), no que concerne ao isolamento entre áreas de circulação e o interior. Deste modo, as portas desempenham um papel fundamental em garantir a privacidade e o necessário e obrigatório controlo de propagação sonora em quartos ou zonas de estar. Este estudo visa abordar o diferencial de desempenho identificado entre os cálculos desenvolvidos em fase de projeto, aplicando metodologias reconhecidas e em resultados de ensaios em laboratórios acreditados no âmbito da certificação de produto. Cumulativamente, pretende encontrar potenciais fatores que contribuam para estas diferenças.

Conclui-se então fundamental abordar as condições inerentes à construção e enfatizar a atenção aos detalhes durante a instalação e entrega final. Sugere-se e recomenda-se o aumento da amostragem de ensaios, que entre outros benefícios aumentará a sensibilização para a importância do tema e contribuirá com informações e saberes relevantes, para toda a fileira da construção.

ABSTRACT

Doors to residential accommodations are known to be the weakest link when it comes to sound insulation from circulation areas to private areas. Thus, acoustic doors play a crucial role in ensuring effective sound control and privacy in residential and hotel rooms. This study aims to address the performance variability identified between in situ testing and in house calculations at design stages applying known methodologies. Addressing the challenges within the construction phase and emphasizing attention to detail during installation and hand-over is critical. Extending the number of sample measurements is also beneficial and brings extra relevant information, to everyone involved.

Keywords — Acoustic doors, sound insulation, in-situ measurements, construction phase, handover.

* **Autor de contacto:** rui.ribeiro@amplitude-ac.eu

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUÇÃO

Em paredes ou outras soluções construtivas, compostas por vários elementos, o desempenho acústico depende não só da capacidade de cada elemento, mas também da ligação/junção entre elementos. Acresce ainda que, para componentes móveis como portas, a instalação e afinação deste elemento carece de maiores cuidados construtivos considerando toda a sua génese e estrutura, composta, entre outros, por um aro, pré-aro, dobradiças, borrachas de vedação e sistemas de fecho do tipo batente, normais em portas de desempenho acústico superior. Todos estes elementos, durante a fase logística e de instalação, estão expostos a condicionantes que podem alterar as suas propriedades base.

Durante um período alargado de 5 anos (2018-2023), foi realizada uma série de ensaios, para determinação do isolamento a sons de condução aérea entre espaços interiores, nomeadamente entre circulações comuns e o interior de frações e/ou chaves hoteleiras. Neste hiato temporal foi possível, de certa forma, manter e controlar condições-tipo, tais como:

- entidade executante;
- relação de espaços, com volumetrias e soluções de revestimento similares, nos compartimentos emissores e recetores;
- sistemas construtivos e respetivos desempenhos acústicos similares, tanto no caso dos paramentos opacos (sistemas leves do tipo gesso cartonado), como dos elementos móveis (portas);
- valor objetivo a verificar, $D_{nT,w} \geq 48$ dB, entre o espaço emissor e recetor, previsto durante o Projeto de Condicionamento Acústico.

2. ENQUADRAMENTO E REQUISITOS

2.1. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

Nos diferentes países Europeus existe regulamentações e normas, relacionadas com o isolamento acústico, que pretendem adequar o desempenho dos diferentes tipos de edificado, em particular daqueles dedicados à habitação. A proliferação de descritores é conhecida e reconhecida [1] [2], sendo que cada um destes documentos têm, como intuito primário, garantir e proteger o conforto no interior dos espaços, criando um ambiente confortável e adequado ao uso.

Em Portugal, estas necessidades são abordadas no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) publicado em Decreto-Lei n.º 129/2002, republicado em Decreto-Lei n.º 96/2008 e com a redação dada pelo Decreto-Lei n.º 95/2019 de 18 de julho [3]. No artigo 5.º deste documento são estabelecidos os requisitos acústicos a cumprir para edifícios habitacionais e mistos, assim como unidades hoteleiras, onde se transcrevem os valores apresentados na alínea c) do ponto 1, referentes ao isolamento sonoro entre circulações comuns e o interior de frações:

“(…)

c) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte:

- i) $D_{nT,w} \geq 48$ dB;
- ii) $D_{nT,w} \geq 40$ dB, se o local for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores;

(…)”.

Nas avaliações *in situ* destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos a que faz referência a legislação, deverá ser ainda contemplado um factor de incerteza, I , de +3 dB associado à determinação das grandezas em análise, para comparativo regulamentar e outros requisitos.

2.2. Avaliação Acústica Final

Em Portugal, de forma a obter licença de utilização de imóveis, devem ser realizados ensaios finais, por laboratório acreditado, que visam atestar a conformidade da obra com o projeto. Os princípios desta avaliação acústica, no âmbito do RRAE, assim como os critérios de amostragem correspondentes, são identificados pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), nomeadamente pelos Pareceres de 10 de julho de 2015 e de 16 de março de 2023 [4] [5], onde, para edifícios habitacionais multifamiliares e/ou hoteleiros, deverão ser analisados para a verificação dos parâmetros regulamentares aplicáveis, as soluções construtivas que tenham:

- a) diferente constituição;
- b) diferente composição.

3. METODOLOGIA E RESULTADOS

3.1. Estimativas teóricas de desempenho

As simulações de cálculo, em particular aquelas com recurso a *software* dedicado, representam um papel fundamental nas fases de desenvolvimento de projeto, permitindo decisões informadas na seleção de materiais e soluções construtivas, assim como nas fases posteriores de obra, como forma de validação das opções construtivas. Contudo, estas ferramentas são uma aproximação da realidade, pelo que cabe aos Projetistas salvaguardar e preconizar soluções otimizadas do ponto de vista custo-benefício. Por outro lado, todas as vicissitudes e incertezas associadas ao ecossistema de obra, de forma a atingir os critérios propostos, devem ter processos e mecanismos de monitorização e controlo que envolvam não só a equipa Projetista, mas também a Fiscalização e a Entidade Executante.

O dimensionamento das soluções foi de acordo com a norma EN 12354 nas suas variantes e emissão atualizada [6], recorrendo a ferramentas internas ou *software* de cálculo (*INSUL* 8.0, *SONarchitect* v.2.4.14, entre outras). As soluções preconizadas e posterior especificação, foi efetuada de forma integrada e compatibilizada entre todos os intervenientes.

O objetivo final estabelecido foi o correspondente a $D_{nT,w} \geq 48$ dB, a verificar entre circulação comum e o interior das frações ou quartos de unidades hoteleiras.

Finalmente, de referir que, durante a fase de assistência técnica à construção, os elementos e soluções instaladas foram acompanhados pelos responsáveis de cada entidade envolvida.

3.2. Amostra *in situ*

De forma a avaliar o desempenho acústico entre circulações comuns dos edifícios e o interior de frações habitacionais e/ou hoteleiras, numa fase preparatória para a realização da respetiva avaliação acústica final, estudaram-se cinco edifícios (denominados para a presente análise de A, B, C, D e E) com a mesma tipologia de construção e volumetrias equiparáveis, e ainda com paramentos de igual constituição e desempenho acústico. Não obstante, de forma a validar o desempenho do paramento opaco, este elemento foi sempre testado e comprovado em obra, com recurso a uma medição *in situ* prévia à instalação da porta.

Os cinco volumes analisados foram construídos ou iniciaram a sua construção entre 2018 e 2023. Realizaram-se, neste hiato temporal, 47 ensaios de isolamento a sons de condução aérea entre circulações comuns e o interior de frações.

À data da realização dos ensaios, os edifícios ainda se encontravam em fase de construção, mas em condição de obra próxima da receção provisória. Os ensaios foram distribuídos conforme o indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaios realizados por edifício habitacional e/ou hoteleiro analisados

Edifício	N.º Ensaios	População	% Amostragem
A	8	188	4%
B	5	112	5%
C	9	93	10%
D	18	139	13%
E	7	210	3%

3.3. Resultados dos ensaios

Na Tabela 2, são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados, distribuído por edifício. Cumulativamente, apresenta-se a mesma distribuição de resultados no gráfico da Figura 1, com marcação do critério estipulado, de 48 dB.

Os resultados reportam aos valores base, sem considerar a incerteza de ensaio prevista na legislação portuguesa. Este factor permite comparar de forma direta e inequívoca resultados entre entidades ou países distintos, que sigam as mesmas normativas.

As campanhas de medição foram realizadas seguindo as normas e metodologias aplicáveis, usando equipamento calibrado, nomeadamente: sonómetro, fonte sonora, microfone, calibrador, amplificador, equalizador e kit transmissor de sinal sem fios. [7] [8] [9]

Tabela 2. Distribuição de resultados, $D_{nT,w}$ [dB], por edifício

A	E01	E02	E03	E04	E05
	33	37	38	31	35
	E06	E07	E08		
	36	43	33		
B	E09	E10	E11	E12	E13
	48	44	39	43	39
C	E14	E15	E16	E17	E18
	39	41	42	37	35
	E19	E20	E21	E22	
D	39	43	46	40	
	E23	E24	E25	E26	E27
	41	42	42	37	38
	E28	E29	E30	E31	E32
	45	43	43	37	42
	E33	E34	E35	E36	E37
	41	39	39	44	34
	E38	E39	E40		
34	39	39			
E	E41	E42	E43	E44	E45
	39	39	41	32	31
	E46	E47			
	33	39			

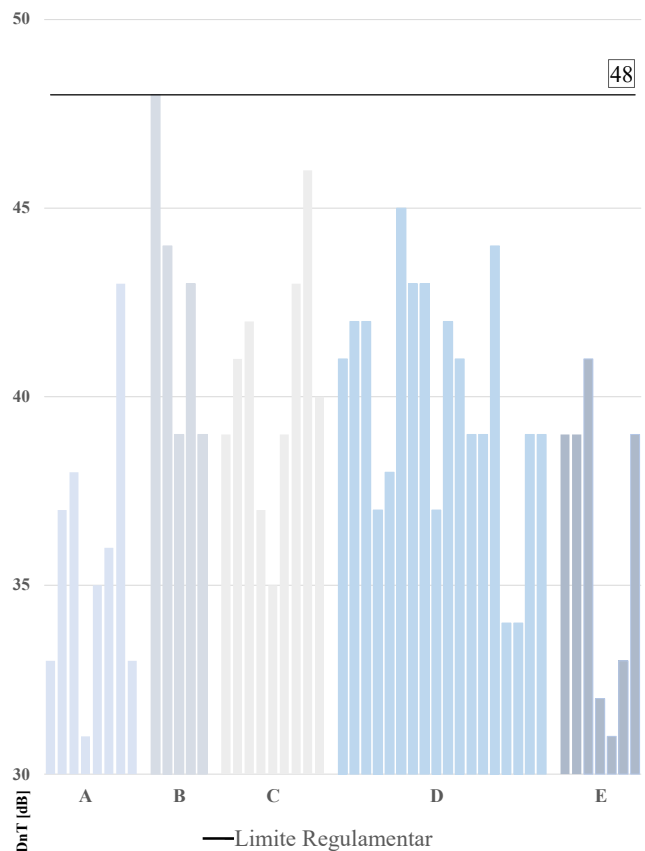


Figura 1. Resultados obtidos nos 47 ensaios *in situ* efetuados, e respetivo valor objetivo

Apresenta-se na Tabela 3 a frequência absoluta dos resultados obtidos.

Tabela 3. Frequência absoluta dos resultados, $D_{nT,w}$ [dB]

Resultado <i>In Situ</i> [dB]	N.º Ensaios	Resultado <i>In Situ</i> [dB]	N.º Ensaios
31	2	40	1
32	1	41	4
33	3	42	4
34	2	43	5
35	2	44	2
36	1	45	1
37	4	46	1
38	2	47	0
39	11	48	1
TOTAL			47

3.4. Análise estatística

Apresenta-se, na Tabela 4., parâmetros estatísticos de interesse para análise de resultados, nomeadamente a média, mediana, moda e desvio padrão. Cumulativamente, encontra-se na figura seguinte, a curva de tendência obtida para os resultados das 47 medições realizadas.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos em função dos resultados obtidos das medições *in situ* (valores desconsiderando a incerteza, *I*, de ensaio)

Parâmetro	Valor [dB]
Média	39
Desvio Padrão	4
Mediana	39
Moda	39

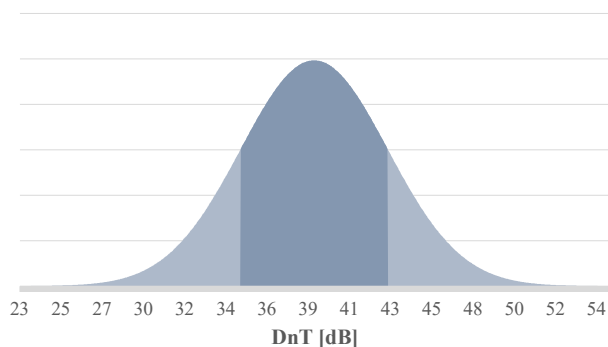


Figura 2. Distribuição normal dos resultados obtidos (desconsiderando o factor incerteza, *I*, de ensaio)

Conforme mencionado no capítulo anterior, a legislação portuguesa contempla um factor de incerteza, *I*, associado a determinação das grandezas agora apresentadas. Nesse sentido, com a aplicação deste factor, a média, mediana e moda destes resultados, encontrar-se-á na ordem dos 42 dB, com o mesmo desvio padrão (4 dB).

3.5. Discussão de resultados das medições

Os resultados permitem verificar um valor médio dos resultados dos ensaios na ordem dos 39 dB (42 dB, se tivermos em consideração o factor de incerteza, *I*) onde a curva de tendência indica $\approx 68\%$ dos resultados estão compreendidos entre os 35 e os 43 dB, e, por conseguinte, distante do objetivo traçado.

Regista-se ainda uma aleatoriedade de valores, compreendidos entre os 31 e os 48 dB, resultando num diferencial total de 17 dB para o mesmo modelo construtivo.

Constata-se que 94% dos ensaios se encontram aquém do valor objetivo, mesmo aplicando o fator de incerteza, *I*, aplicável, implicando trabalhos adicionais de afinação e/ ou

reparação para garantir a condição de realização da Avaliação Acústica final.

Dos 6% que permitiram a verificação do valor objetivo traçado, apenas um dos resultados valida o critério definido sem que seja necessário recorrer á aplicação do fator de incerteza.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em conta as campanhas de ensaios realizadas ainda durante a fase de obra e preparatória à avaliação acústica final, verifica-se um diferencial significativo na reprodutibilidade dos ensaios das soluções construtivas. Dentro da totalidade da amostra avaliada, foi verificada uma dispersão de resultados de 17 dB, entre os valores máximo e mínimo, para soluções construtivas similares.

Analisando cada edifício individualmente, o A foi aquele que apresentou maior dispersão, com uma variação de 12 dB. Tornam-se assim evidentes as variações significativas, que se podem esperar, no desempenho de um mesmo elemento num único imóvel.

Neste contexto, tornam-se evidentes os riscos e desconhecimentos que uma doutrina de amostragem limitada a apenas um caso (desde que com a mesma constituição e composição) poder mascarar ou não diagnosticar eventuais falhas que se possam verificar, de forma generalizada, no edifício construído.

Neste sentido, em nossa opinião, poderá justificar-se e recomendar-se um incremento do número de ensaios a realizar para efeitos de licença de utilização, em particular no caso de construções com distribuição de espaços bastante tipificadas e repetidas. Desta forma, salvaguardar-se-á melhor os interesses e condições de habitabilidade dos imóveis, acautelando bem-estar dos futuros utilizadores.

Complementarmente, é de esperar que o aumento direto do número de ensaios possa alertar e tornar premente um maior controlo e cuidado, durante a fase de construção, permitindo a retificação atempada de eventuais defeitos ou falhas de construção, decorrentes das normais vicissitudes impostas pelo ecossistema de obra. Desta forma seria possível também avaliar-se, de forma inicial, as variações e incertezas associadas à construção com impactos diretos na repetibilidade e reprodutibilidade do seu desempenho. A ausência de monitorização traduz-se numa perda de controlo sistemático da solução construtiva entregue. A título de exemplo, no Reino Unido, atualmente, deverá ser realizado um ensaio em cada dez frações em fase final da obra. No mesmo sentido, o *Building Research Establishment*, estabelece o mesmo critério de aproximadamente 10% da amostra total de frações. [10] [11]

Alerta-se ainda para as vantagens de implementação de um maior controlo de qualidade aos produtos e sistemas construtivos. Atualmente, assume-se que o desempenho de qualquer elemento é transferível e imutável ao longo do tempo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Rasmussen B, Rindel JH. Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe. *Applied Acoustics* 2010;71:171 – 180.
- [2] COST Action TU0901. Integrating and harmonizing sound insulation aspects insustainable urban housing constructions.
- [3] Decreto-Lei n.º 129/2002, republicado em Decreto-Lei n.º 96/2008 e com a redação dada pelo Decreto-Lei n.º 95/2019 de 18 de julho. *Diário da República*, 1.ª série — N.º 110 — 9 de junho de 2008 – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).
- [4] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios – Avaliação Acústica / Critérios Amostragem”, 10 de julho de 2015.
- [5] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios – Avaliação Acústica / Critérios Amostragem”, 16 de março de 2023.
- [6] EN 12354-1 (2017). *Building Acoustics – Estimation of acoustic performance in buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms*.
- [7] NP EN ISO 16283-1 (2014.A1:2017). Acústica - Medição *in situ* do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea.
- [8] NP EN ISO 16283-1 (2014.A1:2019). Acústica - Medição *in situ* do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea.
- [9] NP EN ISO 717-1 (2021). Acústica - Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea.
- [10] The Building Regulations (2010). *Approved Document E: Resistance to the passage of sound*. 2003 edition, incorporating 2004, 2010, 2013 and 2015 amendments.
- [11] *Building Research Establishment*. (2008). *BRE Environmental & Sustainability Standard – BREEAM Education 2008 Assessor Manual*. Manual do assessor



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AED-1 Aislamiento acústico y fuentes de ruido en la edificación.

AIRTIGHTNESS /AIRBORNE SOUND INSULATION STUDY IN ACCREDITED SOUND INSULATION FACILITIES

Ahmed Elsaei^{1,4*}, Alberto Meiss¹, Irene Poza-Casado¹, Jairo González², Miguel A. Padilla-Marcos¹, Ana Espinel², María Machimbarrena³

¹GIR Arquitectura & Energía; Universidad de Valladolid

²AUDIOTEC

³ Departamento de Física Aplicada; Universidad de Valladolid

⁴Department of Mechanical Engineering, Suez Canal University, Egypt

ABSTRACT

The potential relation between airtightness and acoustic performance of constructive solutions is not yet well known and described, although it has been widely proved that both phenomena have strong links.

The objective of this research is to provide additional experimental knowledge in this field of research, working in a controlled environment, thus reducing the number of variables affecting both acoustic performance and airtightness.

The test specimen is a hollow tongue and groove brick with mortar rendering wall. The acoustic performance of the original test specimen has already been tested in AUDIOTEC's accredited sound transmission facilities. The research consists in gradually making holes on the test sample and evaluating airtightness and airborne sound insulation as the amount of "leaks" increases. Airtightness has been measured with a blower door test and the sound insulation has been measured using AUDIOTEC's instruments and facilities.

Palabras Clave— airtightness and sound insulation, air leakage, indoor comfort, air infiltration

1. INTRODUCTION

There are four basic aspects related to the comfort inside a building: acoustic, lighting, hydrothermal, and air quality. Three of these aspects are undoubtedly affected by air leakages in the building: the acoustic, the hydrothermal and the air quality performance of the building.

The most common method for measuring the airtightness of buildings is the pressurization test, also called Blower Door test[1] This test is based on the air permeability law of flow through an orifice which is given by:

$$Q = C \cdot \Delta p^n \quad (1)$$

Where Q is the measured air flow in m^3/h , Δp is the pressure difference measured between both sides of the envelope, C is the air leakage coefficient and n are related to the shape of the hole or kind of airflow (laminar or turbulent) and ranges between 0.5 to 1.

By using the blower door device Δp and Q are measured simultaneously under different pressure differences ranging from 4 Pa to 80 Pa. After that, by plotting both parameters, C and n can be calculated from the graph. Finally, the air leakage can be normalized using either the entire building volume, that is, the air change rate ($n50$), or by the envelope area, that is, the specific leakage rate ($Q50$).

Despite this method's popularity, it has some disadvantages that make it more complicated to implement in some situations. For instance, for testing airtightness in large buildings several fans shall be used and/or the building shall be divided into zones to be studied independently. Also, it is very sensitive to weather conditions such as wind speed and temperature difference, although there are ISO guidelines on how to avoid the temperature influence. Furthermore, it cannot detect the leak's location and only allows quantifying the airtightness of the envelope. To overcome this drawback, there are different methods which are usually combined with

* **Autor de contacto:** ahmedelsaei@uva.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

pressurization tests, such as IR thermography or fog generators.

One of the motivations of this study is to investigate alternative methods to locate and possibly quantify air leaks using acoustic measurements. Since acoustic measurements are performed under natural conditions, no external circumstance (forced pressure difference) would alter the configuration of the envelope elements, thus introducing less sources of error related to this. Besides, the pressurization tests do not include the airtightness of the door where the Blower Door is placed and for the acoustic tests the door would also remain unaltered.

In spite of the fact that it is very intuitive that there must be a relation between air infiltration/airtightness in buildings and the corresponding sound insulation, there are very few studies focused on the relation between both phenomena. Some researchers have aimed at identifying or even quantifying the air leakage size using different acoustic methods, but although it is agreed that both phenomena are related, the subject is not simple and further research is required.

Kölsch B[2] introduces an acoustic beamforming method for detecting leakage locations using microphone arrays using a white noise source with a frequency range of 1-25 kHz. It is observed that sufficiently large leaks are detected over the full frequency range whereas, as the size of the leak decreases, it becomes detectable only at higher frequencies. In this paper it is shown that the acoustic camera in the form of an acoustic beamforming method can be used for detecting and making a very rough estimation of leaks' sizes in the building envelope. Aiming at improving the detection and quantification of air leakages by acoustics measurements, Kölsch B [3] designed a perfectly sealed scale model transmission chamber where different material configurations and openings could be installed between the two spaces. For the acoustic measurements, the author used an ultrasonic dynamic sound source and ¼ inch microphones and the airflow was measured with a Venturi meter installed between and external blower and the chamber. The pressure difference between both chambers was also measured. With this set up, and based on 26 different wall conditions, it was concluded that an estimate of the magnitude of the airflow could be obtained, but again, further research was found necessary.

Other relevant research on this field was performed by Iordache et al, [4]– [6] both under laboratory and in field conditions. The first research on windows in field conditions [4] found, for specific sound pressure levels, differences between in and out and for a specific type of double wood-frame window, that an empirical equation can be used to estimate the air change rate at 4 Pa. The studies they performed under laboratory conditions [5] comparing eight different types of openings on nine different types of windows, concluded again that both phenomena are correlated and that, in certain cases, the infiltrated airflow

could be determined as a function of the global weighted noise level difference ΔLA . Their last study [6] was performed in the same in situ scenario as the first one [4] but with single wood-frame windows and with some refurbishment in the inside of the room. In this case, a different empirical equation was found, which could be used to estimate the air change rate. The very good results found are limited to the specific cases of study, that is, double wood-frame and single wood-frame respectively.

It is thus clear that there is some kind of correlation between airtightness, airflow rate, estimated leakage area and the acoustic performance of a wall, but there are so many potential variables affecting this relation that much more theoretical and experimental research is required to enlighten this field of research. Some of the aspects to study can be related to the shape and size of the leaks, to the material where leaks are located, to the cumulative size or position of the leaks within the wall... And bearing in mind the limitations of acoustic measurements to one single façade or test wall which will be difficult to translate into a full building.

In this context, this study aims at further investigating the relationship between airtightness and airborne sound insulation under a controlled environment where only one variable (opening size) will be modified gradually. The objective of this study is to evaluate the airtightness and acoustic performance of a solid and sealed wall by making successive controlled holes under laboratory conditions.

This is considered the first of a series of experimental studies which will be programmed according to the results of this study.

2. METHODOLOGY

In order to study airtightness and acoustic performance under the same conditions, a sample wall has been mounted in an accredited airborne sound insulation laboratory, that is between two acoustically independent rooms. The sample wall has then been gradually drilled as explained hereinafter. Acoustic and airtightness tests have been performed according to the corresponding standards.

2.1. Laboratory, equipment, and sample description

All measurements were carried out at AUDIOTEC's airborne sound insulation accredited laboratory.

For the acoustic measurements, AUDIOTEC's equipment was used, and measurements were made according to ISO 10140-2 [7] using two different source positions in the source room and a rotating boom both in the source and receiving room. Besides the standardized descriptors found in the literature (R_w , C , C_{tr} , R_A), the A-weighted sound pressure level difference will be calculated according to equation (2)

$$\Delta LA = L1A - L2A \quad (2)$$

where L1A and L2A are the average A-weighted sound pressure level values in the source and receiving room respectively.

The airtightness tests have been carried out by the fan pressurization method, commonly known as Blower Door, according to ISO 9972: 2015 [8]. The equipment used was the Minneapolis Blower Door MiniFan ($5 \text{ m}^3/\text{h} - 2,300 \text{ m}^3/\text{h}$), with serial number DB-CE2336. Pressure gauge DG-1000, with serial number 12547, was also used.

In this case, the airtightness test was done by generating a controlled pressure difference by placing a fan (blower door) at the door opening in the receiving room and leaving the door open in the source room. Each airtightness test consists of a set of seven semi-automatic measurements at different overpressures, 12, 20, 28, 36, 44, 52, and 60 Pa. Before each airtightness test, the fan opening was temporarily covered to measure the pressure difference between the inside and outside, recording zero-flow pressure difference values.

The measured sample is a wall separating the source and receiving room and previously placed on a mobile sample holder. The wall dimensions are 2.8 m in height and 3.6 m in width. The wall is built with extra big format hollow bricks plastered with 15 mm mortar on one side and 5 mm mortar on the other side. The bricks are joined together by tongue and groove joint, and rows are joined by a cementitious adhesive. The sides and the lower part of the sample are finished with cement mortar, while the upper one is with plaster as shown in Figure.1.



Figure 1. The wall in its original state before drilling any holes.

2.2. Measurement protocol

Since, as previously mentioned, the purpose of this research is to study the potential correlation between airtightness and sound insulation, all the acoustic and airtightness measurements will be performed under the same conditions described in the previous section but with different wall openings (drilled holes or controlled holes) situations. Hereinafter the different phases of the experimental work are described:

PHASE 0 or REFERENCE PHASE: Acoustic and airtightness measurement of the original wall without any artificial opening.

PHASE 1: Twenty-four holes are drilled sequentially. The size of the holes is 14 mm diameter, corresponding to $1,54 \text{ cm}^2$. Airtightness and sound insulation are measured after each new hole is made. The order in which the holes are drilled is duly numbered. When the 24 holes are drilled the calculated opening area (OA) is 37 cm^2 (Figure 2).

PHASE 2: All the holes are covered by a previously selected “plastic tap” (see Figure 3) which can be opened and closed on demand. In order to avoid potential leaks around the “taps”, the joints were properly sealed with an ad hoc putty. The diameter of the controlled holes in these taps is 6,7 mm, corresponding to $0,35 \text{ cm}^2$ calculated opening area. Starting from the situation “all tabs closed”, the tabs are opened following the same sequence as in PHASE 1 and airtightness and sound insulation are measured each time a new tap is opened. When the 24 controlled openings are open, the equivalent opening area (OA) is $8,5 \text{ cm}^2$.

PHASES 3 and 4: Two different opening patterns were selected in order to study if the position and total surface of the openings could provide additional information.

The results of PHASES 3 and 4 are not shown in detail in this study but have been used to elaborate Table 2.



Figure 2. The 24 drilled holes for PHASE 1 measurements



Figure 3. The 24 holes covered by a plastic controlled tap

3. AIRTIGHTNESS MEASUREMENTS RESULTS

Figures 4 and 5 represent the permeability curves corresponding to the tests performed in PHASE 0 (no holes), PHASE 1 (with 4, 8, 16, 20 and 24 holes) and PHASE 2 (with 0, 4, 8, 16, 20 and 24 taps open). The quantitative differences between both figures are due to the different size of the holes and the taps-controlled openings as mentioned in the previous section. In both figures the trend is as expected with increasing air leakage both as the pressure difference increases and as the number of holes (opening area) increases. The air leakage values are lower in PHASE 2 due to the smaller size of the taps-controlled openings.

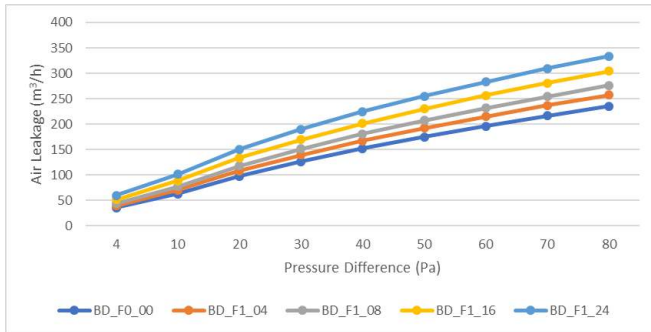


Figure 4. Permeability Curves for Phases 0 and 1

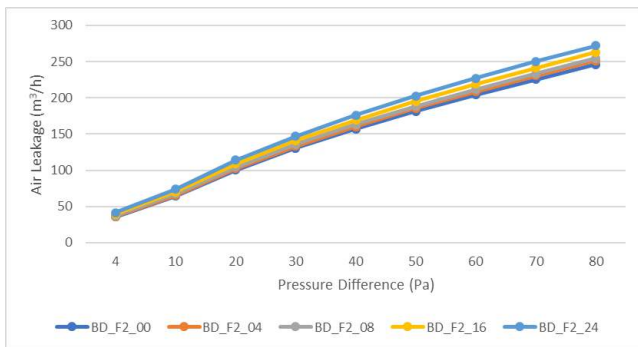


Figure 5. Permeability Curves for Phase 2

Figures 6 to 9 show the relation of Q50 (specific leakage rate under 50 Pa pressure difference) and n50 (air change rate under 50 Pa pressure difference) with the calculated opening area.

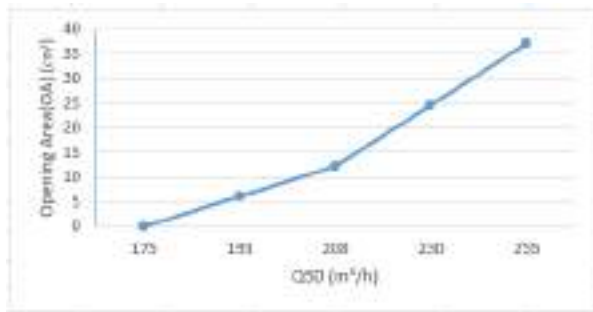


Figure 6. OA/Q50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 drilled holes

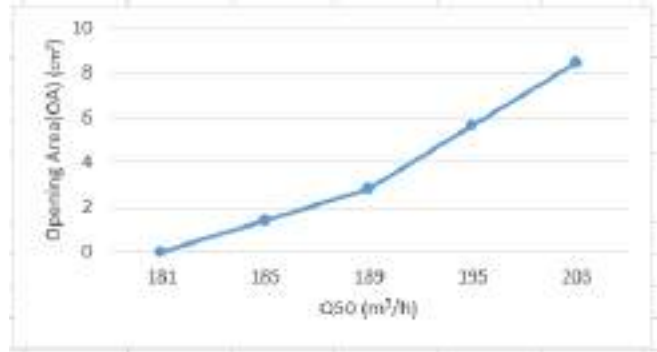


Figure 7. OA/Q50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 tap-controlled openings.

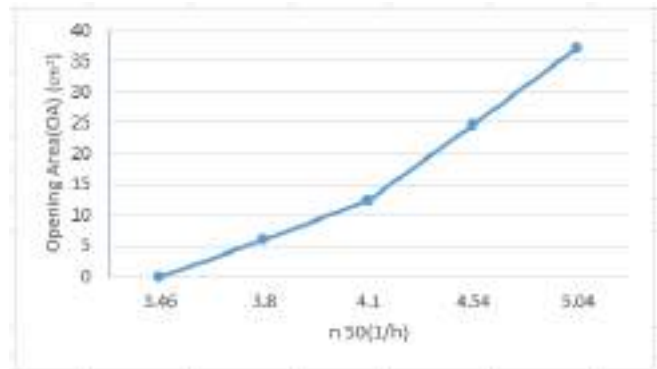


Figure 8. OA/n50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 drilled holes

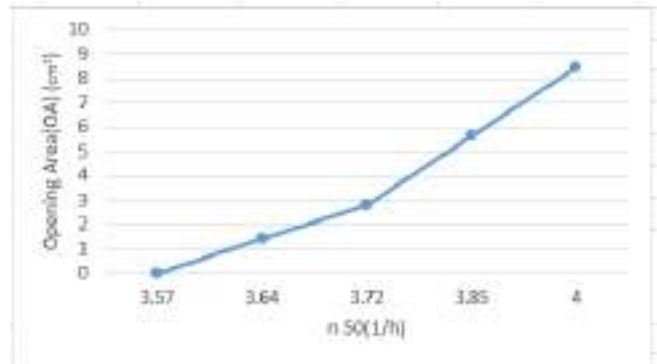


Figure 9. OA/n50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 tap-controlled openings.

For PHASE 1 (figures 6 and 8), when all the 24 holes are drilled, the air leakage value is $Q_{50}=255 \text{ m}^3/\text{h}$, which corresponds to n_{50} approximately equal to 5, that is all the air inside the room is changed 5 times per hour.

For PHASE 2 (figures 7 and 9), when all the 24 tap-controlled openings are open, the air leakage value is $Q_{50}=203 \text{ m}^3/\text{h}$.

It is interesting to point out that if the “completely sealed conditions” in both phases are compared (0 openings) the corresponding Q_{50} and n_{50} values are approximately similar ($175 \text{ m}^3/\text{h}$ and 3.46 h^{-1} for PHASE 1 and $181 \text{ m}^3/\text{h}$ and 3.57 h^{-1} for PHASE 2). This small difference confirms the

successful installation of the plastic taps as far as airtightness is concerned and the possibility of performing tests with the taps closed as if no drill had been performed. The small difference is possibly due to very small leaks around the taps.

Concerning the exponent “n” in equation 1, if all the PHASES are considered, it has been found to vary between 0,57 and 0,67. Figure 10 shows the “n” values obtained for PHASE 1 with increasing number of holes. In this case “n” decreases from 0,63 to 0,57 as the number of holes increases from 0 to 24.

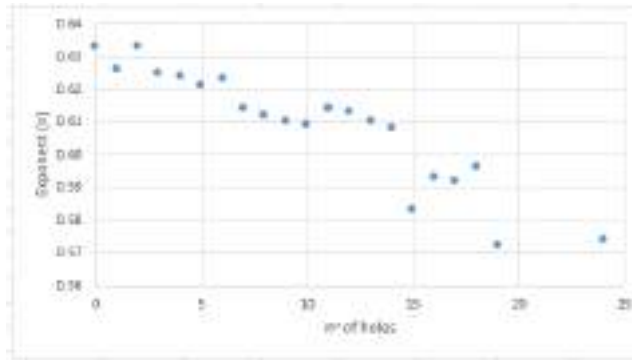


Figure 10. Variation of the Exponent n with the number of holes in PHASE 1.

4. ACOUSTIC MEASUREMENTS RESULTS

Prior to making the acoustic measurements it was expected to observe a decrease in airborne sound insulation as the number of openings was increased, just as an increase in airflow was clearly observed in the previous section.

Unfortunately, the acoustic experimental results have not shown the expected trend, as it is shown hereinafter.

As it can be seen in Tables 1 and 2, no significant difference has been found neither in R_w and other sound typical sound insulation descriptors nor in ΔLA , as the number of holes was increased. This was a surprising result because all acoustic descriptors remained almost invariable as the number of openings was increased. If a tendency was observed, it was in the opposite direction as expected (increasing R_w and ΔLA)! These results are puzzling and need a deeper analysis which will be undertaken in the future.

Table 1: Airborne sound insulation descriptors as a function of n° holes

n° holes	R_w	C	Ctr	RA	RA, tr
4	39	-1	-3	38,6	35,8
8	39	-1	-3	39	36,3
12	39	-1	-2	39,3	36,7
16	39	-1	-2	39,2	36,5
20	39	0	-2	39,5	36,9
24	39	0	-2	39,5	37

Table 2: ΔLA as a function of n° holes and OA

n° holes	OA (cm ²)	ΔL_i (dBA)
0	0	36.6
4	1.4	36.8
4	1.4	36.6
8	2.8	36.9
8	2.8	36.7
11	3.9	36.9
12	4.2	36.8
12	4.6	36.8
12	4.6	36.8
16	5.6	36.8
16	5.6	36.8
20	7.1	36.9
24	8.46	36.9

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Airtightness and acoustic measurements have been performed in a controlled environment over a sample test wall. The sample wall has been gradually modified by making artificial leaks on the wall in the form of successive controlled openings (drills).

The airtightness measurements results are consistent to what is expected, resulting in higher Q50 and n50 values as the total leak area was increased (increased number of holes).

On the other hand, the acoustic results have turned out to be inconclusive, probably due to diverse factors which need to be analysed further in upcoming tests. Some of the future ideas to investigate are the following (but not limited to them):

- Can many very small-size individual leaks have a very different acoustic effect than one bigger leak with a similar equivalent leakage area?
- Can it be possible that although single number quantities do not present a significant variation, these variations would be observed in the spectral results?
- How does the shape of the leak affect acoustic performance of the wall?
- Could an acoustic camera have detected the very small leaks?
- Is there a limit in the leak size that can be properly detected using building acoustics frequency range?

The objective of the research is ambitious and requires much experimental and theoretical input in order to obtain a result which could be properly scaled and exported as an alternative “air leakage” location and quantification system.

6. AKNOWLEDGMENTS

This research is part of the Marie Skłodowska Curie Doctoral Network ActaReBuild project.[9]

7. REFERENCES

- [1] G. Raman, M. Prakash, R. C. Ramachandran, H. Patel, and K. Chelliah, “Remote Detection of Building Air Infiltration Using A Compact Microphone Array And Advanced Beamforming Methods.”
- [2] B. Kölsch, A. Tiddens, J. Estevam Schmiedt, B. Schiricke, and B. Hoffschmidt, “Detection of Air Leakage in Building Envelopes Using Ultrasound Technology,” in *Symposium on Whole Building Air Leakage: Testing and Building Performance Impacts*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2019, pp. 160–183. doi: 10.1520/STP161520180022.
- [3] B. Kölsch, I. Walker, W. Delp, B. Schiricke, and B. Hoffschmidt, “Comparison of Airflow and Acoustic Measurements for Evaluation of Building Air Leakage Paths in a Laboratory Test Apparatus,” 2022. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/6r69f93b>
- [4] V. Iordache and T. Catalina, “Acoustic approach for building air permeability estimation,” *Build Environ*, vol. 57, pp. 18–27, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.04.008.
- [5] V. Iordache and M. Zaharia, “Correlation Analysis of Air Transfer and Sound Wave Transfer,” *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 16, no. 1, pp. 84–90, 2019, [Online]. Available: <http://rjav.sra.ro/index.php/rjav/article/view/124>
- [6] T. Catalina, V. Iordache, and F. Iordache, “Correlation between air and sound propagation to determine air permeability of buildings for single/double wood pane windows,” *Energy Build*, vol. 224, p. 110253, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110253.
- [7] “ISO 10140-2:2010 - Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation.” Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/42088.html>
- [8] ISO, “ISO 9972. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:2015).” 2015. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/55718.html>
- [9] “HORIZON – MSCA – 2021 – DN, No. 101072598 – Acoustic and Thermal Retrofit of Office Building Stock in EU.” Accessed: Sep. 26, 2023. [Online]. Available: <https://actarebuild.eu/>

CORRECCIÓN POR TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE LOS VALORES DE INMISIÓN DE RUIDO – COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES MÉTODOS.

Teresa Carrascal García^{1}*

Belén Casla Herguedas¹

Amelia Romero Fernández¹

¹ Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. IETcc – CSIC. Madrid. España

RESUMEN

En una medición de niveles de presión sonora en un recinto convencional, tal como un dormitorio, pueden encontrarse diferencias de varios decibelios dependiendo de si el recinto está amueblado o no. Este efecto se debe a la absorción acústica y a la difracción debidas al mobiliario o a la existencia de paramentos absorbentes.

Las normas UNE-EN ISO 16032 y UNE-EN ISO 10052 contienen sendos métodos para la medición del nivel de presión sonora de equipos de instalaciones en edificios y permiten el uso de la corrección por tiempo de reverberación o índice de reverberación, que estandariza las mediciones del nivel de presión sonora al tiempo de reverberación de 0,5s.

La normativa española, el RD 1367/2007 y la mayoría de los decretos autonómicos y ordenanzas de aplicación en la evaluación de los niveles de inmisión, ya sea transmitidos por actividades o por instalaciones en el interior de los edificios, no contempla este tipo de corrección. Esta ponencia compara los valores del índice de reverberación obtenido para un total de 180 recintos de viviendas utilizando diferentes métodos, además de analizar los pros y contras de su utilización.

ABSTRACT

When testing the sound pressure levels in ordinary rooms, such as bedrooms, differences of several dB may be found depending on whether the room is furnished or not. This effect is a consequence of the combined effect of acoustic absorption and scattering due to furniture or it may be caused by the existence of absorbent walls and ceilings.

Standards ISO 16032 and ISO 10052 contain separate methods for measuring the sound pressure level of building services in buildings and allow a correction for reverberation time or reverberation index, which standardizes the measurements to the reference reverberation time of 0.5s.

Spanish regulations, RD 1367/2007 and the majority of regional decrees and ordinances applicable to the evaluation

of inmission noise due to activities or service equipment inside buildings, do not include any correction of this type. This paper compares the values of the reverberation time index obtained for 180 rooms in dwellings using different methods, in addition to analyzing the advantages and disadvantages of its use.

Palabras Clave—Tiempo de reverberación, niveles de presión sonora, ruido de instalaciones, corrección por tiempo de reverberación, RD 1367/2007

1. INTRODUCCIÓN

En una medición de niveles de presión sonora en un recinto, se pueden encontrar diferencias de varios decibelios dependiendo de si el recinto está amueblado o no. Este efecto se debe a la absorción acústica y a la difracción debidas al mobiliario.

En el caso concreto de la verificación de exigencias reglamentarias, tales como las del RD 1367/2007[1] o de otros decretos autonómicos y ordenanzas tales como [2] [3] [4], la medición de los niveles de inmisión sonora debidos a las instalaciones de los edificios suele realizarse en dos circunstancias:

1. Mediciones de control de obra terminada con los recintos vacíos y sin ocupar, previos a las correspondientes licencias de primera ocupación;
2. Inspecciones en las que los recintos suelen estar amueblados y en las condiciones finales de utilización.

Salvo en el caso del decreto de 176/2009[5] de Cataluña, ni en el RD 1367/2007, ni en otros decretos autonómicos se especifica una corrección para recintos amueblados en el caso de mediciones de niveles de inmisión de ruido de instalaciones que corrija el efecto de sobrevalorar los resultados de una medición de niveles de presión sonora interiores cuando el recinto está vacío.

* **Autor de contacto:** tcarrascal@ietcc.csic.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Algunos países europeos[6] emplean los índices de presión sonora estandarizados a un tiempo de reverberación de referencia de 0,5s, tales como $L_{Aeq,nT}$, $L_{ASmax,nT}$ o $L_{AFmax,nT}$, descritos en las normas UNE-EN ISO 16032[7] y UNE-EN ISO 10052[8].

La norma UNE-EN ISO 16032[7] especifica el método de ingeniería para la medición del nivel de presión sonora de equipos y redes de instalaciones en los edificios, por otra parte, la UNE-EN ISO 10052[8] describe el método de control para la inspección de características acústicas de los edificios con el fin de simplificar la medida de los niveles de presión sonora. Ambas normas son el procedimiento de medición de referencia para ruido de instalaciones en el interior de los edificios en varios países europeos. [6] [9] [10].

El objetivo de esta comunicación es el análisis de las diferentes opciones para corregir los niveles de ruido por tiempo de reverberación encontradas en la literatura. Se compararán los valores del índice de reverberación obtenido para un total de 180 recintos de viviendas utilizando cada uno de los diferentes métodos propuestos. Los cálculos están basados en los resultados de mediciones del tiempo de reverberación efectuadas en los edificios desde el año 2003 hasta la fecha.

Éste es un trabajo de investigación prenormativa, que tiene la misión de servir de apoyo para el Grupo de trabajo para la revisión técnica del RD 1367/2007, liderado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y en concreto para el subgrupo SG05 Indicadores acústicos y evaluación de los mismos.

2. CORRECCIÓN POR TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Tras el estudio de las normas UNE-EN ISO 16032[7] y UNE-EN ISO 10052[8] y la revisión del decreto 176/2009[5] de Cataluña, se proponen las siguientes 4 opciones para la corrección por tiempo de reverberación aplicables a las mediciones de niveles de presión sonora transmitidos por las instalaciones al espacio interior de los edificios:

1. La corrección de la UNE-EN ISO 16032, que estandariza la medida a un tiempo de reverberación de referencia de 0,5 s, según la siguiente expresión:

$$L_{eq,nT} = L_{eq} - 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad (1)$$

Donde:

$L_{eq,nT}$ es el nivel continuo equivalente de presión sonora normalizado al tiempo de reverberación, dB;

L_{eq} es nivel continuo equivalente de presión sonora transmitido por una instalación determinada y corregido por ruido de fondo, dB;

T es el tiempo de reverberación medido según la UNE-EN ISO 3382-2[11], aplicado para tercios de octava en las bandas de frecuencia de 50 a 5000 Hz, s;

T_0 es el tiempo de reverberación de referencia, $T_0=0,5s$;

Según el borrador ISO DIS 16032: 2023[12], la corrección por T no debe aplicarse a recintos sin amueblar, en los que haya un paramento muy absorbente, por ejemplo, un techo acústico, con el resto de superficies muy reflectantes, para evitar correcciones erróneas debido a tiempos de reverberación altos causados por las reflexiones tardías en las paredes, al mismo tiempo que los niveles de presión sonora se reducen debido a la absorción acústica del paramento más absorbente.

2. Aplicar el índice de reverberación, k , recogido en la norma UNE-EN ISO 10052[8], donde el tiempo de reverberación se obtiene mediante mediciones, según las ecuaciones 2 y 3 :

$$L_{Aeq,nT} = L_{Aeq} - k \quad (2)$$

$$k = 10 \lg \frac{T_{500} + T_{1000} + T_{2000}}{T_0} \quad (3)$$

Donde:

$L_{Aeq,nT}$ es el nivel global continuo equivalente de presión sonora ponderado A, normalizado al tiempo de reverberación, dB;

L_{Aeq} es nivel global continuo equivalente de presión sonora ponderado A transmitido por una instalación determinada y corregido por ruido de fondo, dB;

k es el índice de reverberación;

T es el tiempo de reverberación medido según la norma UNE-EN ISO 3382-2[11] para las bandas de octava de 500, 1000 y 2000Hz.

T_0 es el tiempo de reverberación de referencia, $T_0=0,5s$;

3. Aplicar el índice de reverberación, k , usando tabulaciones para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz, como propone la norma UNE-EN ISO 10052[8], que contiene una serie de tabulaciones de k aplicables a recintos amueblados y sin amueblar hasta un volumen de 150 m³. Las tablas permiten estimar el índice k por octavas desde 125 a 2000Hz, que es elegido en función de las características de los recintos objeto de ensayo.

Los valores de k de la tabla 4 de la UNE-EN ISO 10052 se basan en tiempos de reverberación obtenidos en varios países europeos desde 1960 a 1980. Según dicha norma, la desviación típica de los índices calculados de estos datos es de 1 dB aproximadamente.

4. Aplicar un valor por defecto fijo a las mediciones de nivel de presión sonora en el interior, como es el caso del Decreto 176/2009 de Cataluña, que sustrae 3 dB a los niveles medidos si “*la habitación está vacía, sin mobiliario, y no tiene ningún tratamiento absorbente en el techo*”.

Estos 3 dB que se sustraen corresponden a aplicar un tiempo de reverberación de 1 s.

3. METODOLOGÍA

Esta ponencia expone y compara los resultados obtenidos al aplicar las 4 opciones de corrección por tiempo de reverberación descritas en el apartado 2 a un total de 180 recintos de viviendas, que eran salones y dormitorios, cuya geometría, tiempo de reverberación y tipo de paramentos eran conocidos. Para cada uno de los 180 recintos se ha calculado k , índice de reverberación y los resultados se muestran en la figura 4.

Los ensayos empleados fueron en parte encargados y en parte realizados por la Unidad de Calidad en la Construcción del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja desde el año 2003 hasta la fecha con el objeto de conocer el aislamiento acústico a ruido aéreo y de impactos de los edificios, D_{nT} y L'_{nT} . En dichas mediciones, deben realizarse además ensayos de tiempo de reverberación en los recintos receptores, por lo que se disponían de resultados de T desde 100 a 5000Hz de los recintos. Los ensayos se realizaron conforme a la norma UNE-EN ISO 3382-2. 2008[11] y su versión previa UNE-EN ISO 3382:2001[13], ya anulada

3.1. Muestra analizada

La muestra estaba compuesta por un total de 180 recintos, con volúmenes comprendidos entre 17 y 102 m³. Se trataba de salones y dormitorios sin amueblar.

Respecto a los elementos constructivos, todos contaban con forjados unidireccionales de hormigón con entrevigado cerámico o de hormigón, que podríamos asimilar a un forjado homogéneo. En cuanto a las particiones que delimitaban los recintos, 71 recintos, 41% del total, presentaban particiones de ladrillo hueco revestidas con un enlucido de yeso, asimismo como trasdosados de fachada de ladrillo. El resto de los recintos, estaban compuestos por particiones y trasdosados de fachada cuyo acabado final era una o varias placas de yeso laminado sujetas a una perfilera autoportante metálica con lana mineral en la cámara.

La figura 1 muestra la distribución de tiempos de reverberación en los recintos, establecido como el promedio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz, cuyo promedio es de 1,4 s.

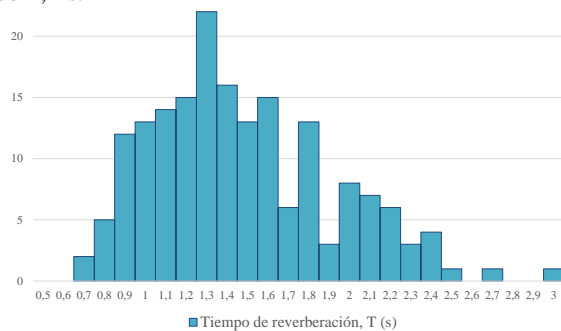


Figura 1. Histograma de tiempos de reverberación.

La figura 2 muestra la dispersión de los valores de T en relación a los volúmenes de los recintos. Los puntos azules corresponden con recintos en los que las particiones y trasdosados de fachada estaban formadas por una o varias placas de yeso laminado sujetas a una perfilera autoportante metálica con lana mineral en la cámara, lo que se ha denominado en la figura como “*entramado autoportante*”. Los puntos rojos corresponden con recintos cuyas particiones y fachadas eran de ladrillo hueco enlucido al interior. Con una línea de trazos verdes se ha marcado el valor de T_0 de 0,5 s que es el tiempo de reverberación de referencia en las normas UNE-EN ISO 16032 y UNE-EN ISO 10052. Todos los recintos superan este valor de 0,5 s.

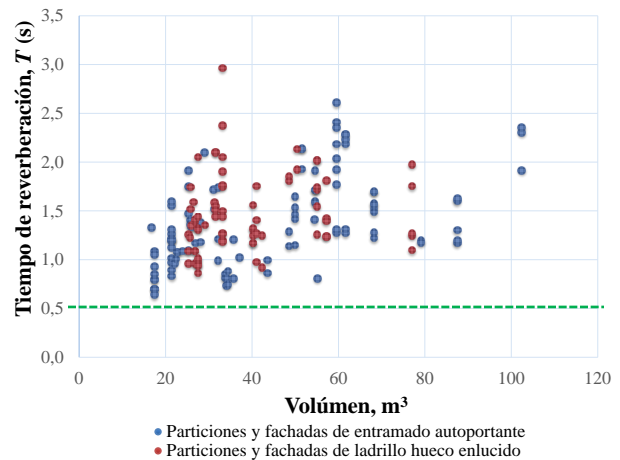


Figura 2. Dispersión de los valores de T en relación al volumen de los recintos.

3.2. Procedimiento de cálculo de k para cada opción

Para las opciones 2, 3 y 4 descritas en el apartado 2, k , índice de reverberación, es una corrección que se resta a los valores globales del nivel de presión sonora obtenidos en una medición, sin embargo, en el caso de la aplicación de la UNE-EN ISO 16032, primera opción del apartado 2, la corrección por tiempo de reverberación se aplica a cada una de las bandas de tercio de octava de 50 a 5000 Hz.

Para facilitar la comparación entre los valores que toma k según la primera opción (UNE-EN ISO 16032) y las opciones 2, 3 y 4, para la primera opción se ha hallado k , como la resta entre el valor L_{Aeq} , nivel global continuo equivalente de presión sonora ponderado A, y el valor $L_{Aeq,nT}$, nivel global continuo equivalente de presión sonora ponderado A, normalizado al tiempo de reverberación, ecuación 4.

$$k = L_{Aeq} - L_{Aeq,T} = 10 \left(\lg \sum 10^{\frac{L_{Aeq}(\frac{1}{3}oct)}{10}} - \lg \sum 10^{\frac{L_{Aeq,T}(\frac{1}{3}oct)}{10}} \right) \quad (4)$$

Los valores globales de L_{Aeq} y $L_{Aeq,nT}$ en cada uno de los recintos se han calculado a partir de valores de tercio de octava del resultado de una estimación de los valores de nivel de presión sonora producidos por la radiación de una rejilla de impulsión de aire en cada uno de los recintos.

Para el cálculo de este nivel de presión sonora en cada uno de los recintos producido, se ha partido de las mediciones reales de una instalación de ventilación de una vivienda que estaba formada por una serie de conductos que impulsaban el aire desde la unidad de recuperación de calor a los recintos protegidos. A partir de los datos de presión sonora medidos en un punto de un recinto, se ha obtenido el nivel de potencia sonora, L_w de la rejilla según la expresión 5, empleando el índice de directividad, Q , la distancia a la rejilla, r , y la constante de la sala, R , valores que eran conocidos.

$$L_w = L_p - 10 \lg \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \quad (5)$$

La figura 3 muestra un esquema de la ubicación de la rejilla en las mediciones que fueron objeto de estudio en otra comunicación[14].

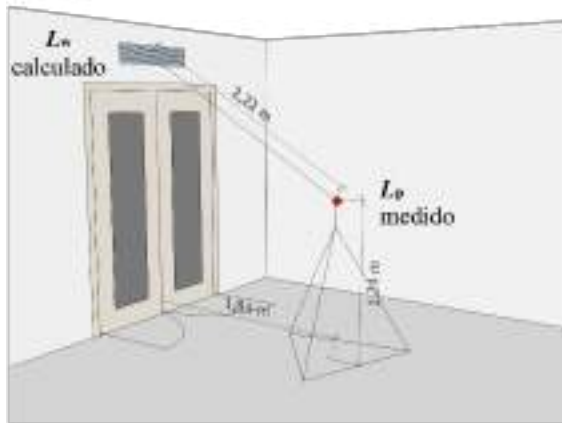


Figura 3. Posición de la boca de impulsión (rejilla) y sonómetro, representado como una esfera roja, en las mediciones de niveles de presión sonora en [14], que se tomaron de referencia para el cálculo de la potencia acústica de una boca de impulsión de aire.

Tabla 1. Niveles de potencia acústica en octavas calculados para una boca de impulsión de aire en una vivienda.

f [Hz]	L_w [dB]
125	34,7
250	34,9
500	21,5
1000	15,4
2000	10,6
4000	13,6

Una vez obtenido el nivel de potencia de la rejilla, mostrado en la tabla 1, se ha aplicado ese nivel de potencia a cada uno de los 180 recintos según la ecuación 6, que es una simplificación de la ecuación 5 para el caso de que $\frac{4}{R} \gg \frac{Q}{4\pi r^2}$ [15] en el que la atenuación por distancia es despreciable.

$$L_p = L_w - 10 \lg V + 10 \lg T + 14 \quad (6)$$

Donde V y T son el volumen del recinto receptor y el tiempo de reverberación de cada recinto respectivamente, que son datos conocidos para cada uno de los 180 recintos.

Una vez calculados los niveles de presión acústica producidos por la radiación de una rejilla en cada uno de los 180 recintos, ecuación 6, se han corregido por tiempo de reverberación en las bandas de tercio de octavas de 100 a 5000 Hz según la ecuación 1. La diferencia entre el valor global corregido y sin corregir de los niveles de presión sonora continuos equivalentes es k , índice de reverberación, según la ecuación 4.

De todos los tipos de instalaciones posibles, se ha elegido una rejilla de impulsión, puesto que es una fuente de ruido aéreo y su componente estructural es despreciable.

Para la opción 2, k se ha calculado a partir de los valores medidos de T para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.

Para la opción 3, se ha aplicado la tabla 4 de la norma UNE-EN ISO 10052 y en el caso de la opción 4, k toma un valor fijo de 3 dB.

4. RESULTADOS

La figura 4 muestra los valores de k , índice de reverberación, para cada una de las 4 opciones.

- **Opción 1**, representada en azul en la figura 4, que consiste en aplicar la corrección por T a los valores de tercio de octava desde 100 a 5000 Hz en las mediciones del nivel de presión sonora, siguiendo el procedimiento de la UNE-EN ISO 16032. (La UNE-EN ISO 16032 indica que la corrección por reverberación se aplique para los valores de T desde 50 a 5000 Hz. Sin embargo, en este trabajo sólo se disponen valores de T desde 100 a 5000 Hz).
- **Opción 2**, representada en rojo en la figura 4, que consiste en aplicar el índice de reverberación, k , obtenido según mediciones de T de 500, 1000 y 2000 Hz, aplicado de forma global sobre los valores de L_{Aeq} , según se indica en la norma UNE-EN ISO 10052.
- **Opción 3**, representada en negro en la figura 4, que consiste en aplicar los valores tabulados de la norma UNE-EN ISO 10052 al índice de reverberación, k .
- **Opción 4**, representada en línea verde discontinua en la figura 4, que consiste en aplicar un valor fijo para k de 3 dB, siempre que los recintos no estén

amueblados o no tengan ningún paramento absorbente, por ejemplo, un techo acústico.

En el eje horizontal se han representado los recintos por volumen creciente, las letras del eje x corresponden con la siguiente agrupación de volúmenes que coinciden con las de la tabla 4 de la UNE-EN ISO 10052.

Tabla 2. Leyenda empleada en la figura 4 en el eje x para indicar el volumen de los recintos

Letra	$V [m^3]$
A	$V < 15$
B	$15 \leq V < 35$
C	$35 \leq V < 60$
D	$60 \leq V < 150$

En la figura 4 se observa que las diferencias máximas entre los valores que toma k , índice de reverberación, en las

opciones 1 y 2, que son aquellas basadas en mediciones, es de 1,8 dB. Las diferencias son debidas a que en la opción 2 sólo se tienen en cuenta los tiempos de reverberación de las octavas de 500, 1000 y 2000 Hz, mientras que en la opción 1, se han tenido en cuenta los valores de tercios de octava desde 100 a 5000 Hz.

Sin embargo, las diferencias entre los valores de k obtenidos a partir de mediciones en las opciones 1 y 2, y los valores tabulados de la UNE-EN ISO 10052 son mayores, llegando al máximo de 3,5 dB. Esto se debe a que los valores tabulados son en realidad valores promedio obtenidos de una muestra amplia.

Finalmente, $k = 3$ queda por debajo de la mayoría de los valores medidos y tabulados, siendo un valor conservador en la mayoría de los casos analizados, excepto en aquellos recintos de menor volumen, para los que un valor de 3 dB resulta sobrevalorado.

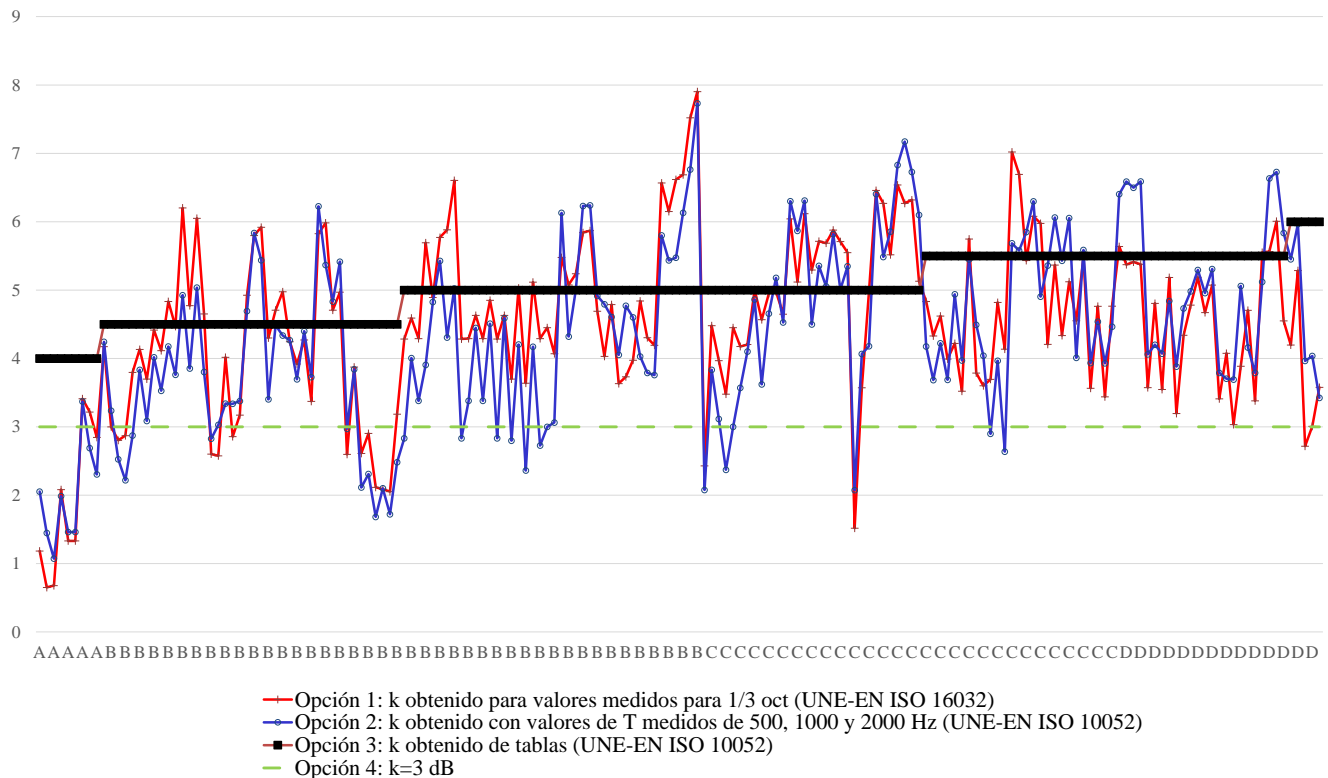


Figura 4. Valores del índice de reverberación, k , obtenido para cada recinto mediante cada una de las 4 opciones analizadas

5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA OPCIÓN

Las correcciones de las opciones 1 y 2 son las que presentan un mayor grado de exactitud, ya que se basan en mediciones del tiempo de reverberación de los recintos y no en

estimaciones. Sin embargo, al precisar de la medición de T , requieren del equipamiento necesario y alargan el procedimiento de ensayo del nivel de presión sonora transmitido por cualquier instalación en un recinto interior.

En cuanto a las opciones 3 y 4, al estar basadas en valores tabulados o fijos, son fáciles de implementar, ya que no

requieren de ningún tipo de ensayo. Aun así, la facilidad de aplicación tiene como contrapartida una menor exactitud.

Por otro lado, en lo que respecta a la integración de cualquiera de estas 4 opciones con el procedimiento de medida y evaluación de ruido de actividades o instalaciones del RD1367/2007[1], cualquiera de las opciones que aplican índices de reverberación globales, opciones 2, 3 y 4, son fáciles de integrar, puesto que el resto de correcciones por componentes (baja frecuencia, K_f , impulsividad, K_i , y tonalidad, K_t) del RD 1367/2007 se aplican a los valores globales de L_{Aeq} corregidos por ruido de fondo. En la primera opción se debe aplicar la corrección por tiempo de reverberación al nivel de presión sonora corregido por ruido de fondo desde 50 a 5000Hz, para obtener después un valor global al cual habría que sumar las correcciones por bajas frecuencias, impulsividad y tonos emergentes (K_f , K_i y K_t).

6. CONCLUSIONES

En las mediciones del nivel de presión sonora de un recinto, pueden encontrarse diferencias de varios decibelios dependiendo de si el recinto está o no amueblado debido a la absorción y la difracción de los muebles. En el procedimiento de medida y evaluación del RD 1367/2007[1] para emisores concretos, como actividades o instalaciones no existe ninguna corrección que tenga en cuenta este efecto, sin embargo, hay situaciones en las que la evaluación de los emisores se va a producir con los recintos sin amueblar.

En esta comunicación se han analizado las posibles correcciones por tiempo reverberación existentes en las normas UNE-EN ISO 16032[7], UNE-EN ISO 10052[8] y en algunos decretos autonómicos, de los cuales, sólo el 176/2009[5] de Cataluña establece dicha corrección.

Se han propuesto 4 opciones de índice de reverberación, k , de aplicación sobre los resultados de una medición de los niveles de presión acústica transmitidos por las instalaciones del edificio:

- **Opción 1:** Normalizar las medidas de nivel de presión sonora a un tiempo de reverberación de referencia de 0,5s desde 50 a 5000 Hz para valores de tercio de octava según UNE-EN ISO 16032[7].
- **Opción 2:** Aplicar el índice de reverberación, k , obtenido según mediciones de T de 500, 1000 y 2000 Hz de forma global sobre los valores de L_{Aeq} , según se indica en la norma UNE-EN ISO 10052.
- **Opción 3:** Aplicar valores tabulados del índice de reverberación, k , según la norma UNE-EN ISO 10052.
- **Opción 4:** Aplicar un valor fijo para el índice de reverberación, k , para recintos sin amueblar, $k = 3$ dB.

Se han calculado y comparado los resultados obtenidos al aplicar cada una de las 4 opciones de corrección por tiempo de reverberación a un total de 180 recintos de viviendas, que eran salones y dormitorios, cuya geometría, tiempo de

reverberación y tipo de paramentos eran conocidos. Se trataba de recintos vacíos sin muebles, con volúmenes comprendidos entre 17 y 102 m³. El tiempo de reverberación medio obtenido era de 1,4 s, mayor que $T_0 = 0,5$ s de referencia de las normas estudiadas.

En cuanto a los resultados de k de cada opción, la tabla 4 muestra que las opciones 1 y 2 son las más precisas, ya que se basan en mediciones del tiempo de reverberación de los recintos. La máxima diferencia entre la aplicación de la opción 1 y la 2 es de 1,8 dB.

En el caso de la opción 3, las diferencias entre los valores de k obtenidos a partir de mediciones (opciones 1 y 2) y los valores tabulados de la UNE-EN ISO 10052 son mayores, llegando al máximo de 3,5 dB.

Finalmente, $k = 3$ queda por debajo de la mayoría de los valores medidos y tabulados, siendo un valor conservador en la mayoría de los casos, excepto en aquellos de menor volumen, para los que un valor de 3 dB está sobrevalorado.

Esta comunicación no aborda si el tiempo de reverberación de los recintos amueblados es cercano a 0,5 s.

Finalmente, estos trabajos de investigación prenormativa servirán de apoyo al grupo técnico para la revisión del RD 1367/2007, en concreto al SG05 Índices acústicos y evaluación de los mismos.

6. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de la Presidencia, RD 1367/2007 de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. (BOE 23/10/2007)., vol. 254. 2007, pp. 42952-42973. [En línea]. Disponible en: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-18397
- [2] Gobierno Vasco, Decreto 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica de la Comunidad Autónoma del País Vasco., vol. 222. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.leggeunea.euskadi.eus/eli/es-pv/d/2012/10/16/213/dof/spa/html/webleg00-contfich/es/>
- [3] Junta de Andalucía, Decreto 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica en Andalucía, y se modifica el Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética., vol. BOJA 24. 2012, pp. 7-37. [En línea]. Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documentos/20151/427498/contaminacion+acustica.pdf/cf4d1534-4ff8-eff8-07c9-bf7f1227c5c7?t=1467628174000>
- [4] Junta de Castilla y León, LEY 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León., vol. BOCYL 107. 2009, p. Suplemento al nº 107. 2-36. [En línea]. Disponible en: <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/800/1014/Ley%20del%20ruido.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobnocache=true>
- [5] Generalitat de Catalunya, Decreto 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley

- 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica, y se adaptan sus anexos, vol. DOGC 5506, n.º D 176/2009. 2009, pp. 85734-85797.
- [6] Carrascal García, Teresa, A. Romero Fernández, y M. B. Casla Herguedas, «Noise from Building Services: Comparison of Technical Requirements in Sixteen Countries», en Proceedings of the Forum Acusticum FA2020 Conference, dic. 2020, p. 255. doi: 10.48465/fa.2020.0210.
- [7] UNE-EN ISO 16032: 2005. Acústica. Medición del nivel de presión sonora de los equipos técnicos en los edificios - Método de peritaje (ISO 16032:2004).
- [8] AENOR, UNE-EN ISO 10052:2022 Acústica. Mediciones in situ del aislamiento a ruido aéreo, ruido de impactos y ruido de equipos técnicos. Método de control. (ISO 10052:2021). Madrid: AENOR, 2022.
- [9] B. Rasmussen y T. Carrascal García, «Noise from ventilation systems in dwellings - Regulations and field test procedures in selected countries in Europe», INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc., vol. 265, n.º 1, pp. 6221-6229, feb. 2023, doi: 10.3397/IN_2022_0926.
- [10] B. Rasmussen, T. Carrascal, y S. Secchi, «A Comparative Study of Acoustic Regulations for Hospital Bedrooms in Selected Countries in Europe», Buildings, vol. 13, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2023, doi: 10.3390/buildings13030578.
- [11] AENOR, UNE-EN ISO 3382-2:2008. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008). Madrid: AENOR, 2008.
- [12] ISO, ISO DIS 16032, 2023 Edition, April 20, 2023 : Acoustics — Measurement of sound pressure level from service equipment or activities in buildings — Engineering method. 2023.
- [13] UNE, Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos. (ISO 3382:1997) (Anulada). Madrid, España: UNE, 2001.
- [14] T. Carrascal, A. R. Fernández, y B. C. Herguedas, «Applying Spanish Acoustic Regulations to Mechanical Ventilation with Heat Recovery Systems - Case Study», en Proceedings of InterNoise22, Institute of Noise Control Engineering, 2022, pp. 2271-2280(10). doi: https://doi.org/10.3397/IN_2022_0325.
- [15] VDI. Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2081. Blatt 1 / Part 1. Noise generation and noise reduction in air-conditioning systems. Düsseldorf. Alemania: VDI. Verein Deutscher Ingenieure, 2001.

ESTUDO DE CASOS PRÁTICOS DE MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO DE FACHADAS

Jorge Célio Fradique^{1*}
Hélder Gonçalves Martins²
Marco Antunes Mateus²

¹ Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I. P., Oeiras, Portugal

² Acustalbi, Castelo Branco, Portugal

RESUMO

Os ensaios de isolamento sonoro de fachadas, realizados de acordo com a norma NP EN ISO 16283-3, são dos ensaios de isolamento sonoro mais realizados, particularmente em regiões onde a construção em altura não é predominante. No entanto, alguns parâmetros podem influenciar os resultados, e pôr em causa o cumprimento dos requisitos legais.

Este estudo analisa um conjunto alargado de ensaios efetuados, na perspetiva de avaliar a influência de parâmetros como a percentagem de área translúcida e a eventual necessidade de utilização dos parâmetros C ou Ctr, nos valores de isolamento sonoro e no conseqüente cumprimento dos requisitos legais aplicáveis.

São também apresentados os valores de incerteza calculados de acordo com a norma EN ISO 12999.

Os resultados são analisados considerando a aplicação da legislação em vigor, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei 96/2008, que define um fator de incerteza, a utilizar nas avaliações *in situ*, para verificação do cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios.

ABSTRACT

Facade sound insulation tests, carried out in accordance with the NP EN ISO 16283-3 standard, are one of the most frequently carried out sound insulation tests, particularly in regions where high-rise construction is not predominant. However, some parameters may influence the results and call into question compliance with legal requirements.

This study analyzes a wide range of tests carried out, with a view to evaluating the influence of parameters such as the percentage of translucent area and the possible need to use the C or Ctr parameters, on sound insulation values and the consequent compliance with applicable legal requirements.

Uncertainty values calculated in accordance with EN ISO 12999 are also presented.

The results are analyzed considering the application of current legislation, the Regulation on Acoustic Requirements for Buildings, approved by Decree-Law 96/2008, which defines an uncertainty factor, to be used in *in situ* assessments, to verify compliance with these acoustic requirements.

Palavras Chave — isolamento, fachada, incerteza, regulamento.

1. INTRODUÇÃO

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei 96/2008 [1], estabelece um conjunto de requisitos de isolamento sonoro, aplicáveis às fachadas de diversos tipos de edifícios. O mesmo regulamento define a aplicação de um fator de incerteza, *I*, a utilizar nas avaliações *in situ*, a adicionar aos valores medidos de isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas, $D_{2m,nT,w}$.

De acordo com o referido regulamento, os ensaios acústicos devem ser realizados de acordo com as normas aplicáveis, em vigor. No caso em apreço, para isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas, as normas em vigor atualmente são a norma NP EN ISO 16283-3 [2], que descreve os procedimentos para as medições *in situ* de isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas, e a norma NP EN ISO 717-1 [3], que define os índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios e estabelece a metodologia para determinação destes índices a partir dos resultados das medições efetuadas por bandas de frequências, com a largura de um terço de oitava, de acordo com a norma NP EN ISO 16283-3.

O cálculo de incerteza dos ensaios encontra-se também definido na norma NP EN ISO 12999-1 [4], que especifica os

* **Autor de contacto:** jorge.fradique@iniav.pt

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

procedimentos para a avaliação da incerteza de medição do isolamento sonoro em acústica de edifícios.

Este artigo analisa um conjunto de ensaios recentes de isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas, na perspectiva do cumprimento do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, analisa a influência da utilização dos termos de adaptação espectral, C ou C_{tr} , nos valores de isolamento sonoro e no conseqüente cumprimento dos requisitos legais aplicáveis e compara os valores de incerteza calculados para estes ensaios, com os valores da norma NP EN ISO 12999-1 e com o fator de incerteza, I , definido no regulamento.

2. DADOS E METODOLOGIA

Foram utilizados os dados correspondentes a 90 ensaios de isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas, realizados entre outubro de 2022 e agosto de 2023.

Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma NP EN ISO 16283-3 e NP EN ISO 717-1, por um laboratório acreditado para os mesmos.

Estes ensaios baseiam-se na utilização de uma fonte sonora, no exterior da fachada, com incidência das ondas sonoras a 45° , sendo caracterizado o nível médio de pressão sonora, no exterior, a 2 m da fachada em ensaio, $L_{1,2m}$. No interior do compartimento é determinado o nível médio de pressão sonora média-energética no compartimento, L_2 , tendo sido utilizadas posições fixas de microfones, com recurso a um tripé. Determina-se de seguida o isolamento sonoro bruto, D_{2m} , que corresponde à diferença de nível entre $L_{1,2m}$ e L_2 calculada de acordo com a expressão:

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad (1)$$

Por fim, obtém-se o isolamento sonoro padronizado, $D_{2m,nT}$, considerando o tempo de reverberação no compartimento recetor face ao tempo de reverberação de referência, e calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \lg(T/T_0) \quad (2)$$

Recorrendo à norma NP EN ISO 717-1, que define o método de adaptação à curva de referência, obtém-se o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios, $D_{2m,nT,w}$, parâmetro utilizado na legislação, bem como os termos de adaptação espectral, C ou C_{tr} .

Para a realização destes ensaios, foi utilizado o seguinte conjunto de equipamentos:

- Sonómetro analisador 01dB, Solo;
- Calibrador RION NC-74;
- Fonte sonora dodecaédrica 01dB Omni12;
- Amplificador 01dB Ampli12.



Figura 1. Equipamento de ensaio, fonte sonora e sonómetro.

O sonómetro e o calibrador foram verificados e calibrados no ISQ – Instituto de Soldadura e Qualidade, entidade qualificada e acreditada para o efeito.

3. RESULTADOS GLOBAIS PARA OS ÍNDICES DE ISOLAMENTO

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios define os requisitos para isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas, em função do tipo de edifício e da sua utilização.

3.1. Requisitos regulamentares – edifícios habitacionais e mistos

Assim, para edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras o índice de isolamento sonoro a sons de condução

aérea, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos deve satisfazer o seguinte:

i) $D_{2m,nT,w} \geq 33$ dB, em zonas mistas ou em zonas sensíveis reguladas pelas alíneas c), d) e e) do n.º 1 do artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído;

ii) $D_{2m,nT,w} \geq 28$ dB, em zonas sensíveis reguladas pela alínea b) do n.º 1 do artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído;

iii) Os valores limite dos índices referidos nas subalíneas i) e ii) são acrescidos de 3 dB, quando se verifique o disposto no n.º 7 do artigo 12.º do Regulamento Geral do Ruído;

iv) Quando a área translúcida for superior a 60 % do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr} , conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites das subalíneas i) e ii);

3.2. Requisitos regulamentares – edifícios comerciais e de serviços

Os edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais os edifícios que se destinem a usos comerciais ou de prestação de serviços, ou partes análogas integradas em edifícios industriais, estão sujeitos ao cumprimento dos seguintes requisitos acústicos:

a) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior dos edifícios, como local emissor, e os locais tipificados no quadro I do anexo ao presente Regulamento, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

i) $D_{2m,nT,w} \geq 30$ dB, para os escritórios;

ii) $D_{2m,nT,w} \geq 25$ dB, para os restantes recintos;

iii) Quando a área translúcida for superior a 60 % do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr} , conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites das subalíneas i) e ii);

3.3. Requisitos regulamentares – edifícios escolares e similares

Os edifícios escolares e similares, de investigação e de leitura estão sujeitos aos seguintes requisitos acústicos:

a) O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior dos edifícios, como local emissor, e os compartimentos interiores identificados no quadro II do anexo ao presente Regulamento, como locais recetores, deve satisfazer o seguinte:

i) $D_{2m,nT,w} \geq 33$ dB, em zonas mistas ou em zonas sensíveis reguladas pelas alíneas c), d) e e) do n.º 1 do artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído;

ii) $D_{2m,nT,w} \geq 28$ dB, em zonas sensíveis reguladas pela alínea b) do n.º 1 do artigo 11.º do Regulamento Geral do Ruído;

iii) Quando a área translúcida for superior a 60 % do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr} , conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites das subalíneas i) e ii);

3.4. Requisitos regulamentares – fator de incerteza

Nas avaliações in situ destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um fator de incerteza, I , associado à determinação das grandezas em causa.

O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis, quando:

a) O valor obtido para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{2m,nT,w}$, acrescido do fator I no valor de 3 dB, satisfaça o limite regulamentar.

3.5. Resultados globais

Para os ensaios analisados, verifica-se que todos os cumprem os limites regulamentares para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachada, $D_{2m,nT,w}$, tendo em consideração o fator de incerteza definido no regulamento.

Tabela 1. Tipologia dos locais ensaiados.

Tipologia	Número de ensaios
Moradia	59
Habituação	7
Escola	3
Hotel	2
Comércio	17
Escritório	2

Verificou-se no entanto que, em 8 dos ensaios em moradias, cerca de 14% do total de moradias, o resultado obtido apenas permitia cumprir o limite legal para zonas sensíveis, que é de $D_{2m,nT,w} \geq 28$ dB, ficando abaixo do limite legal para zonas mistas, que é de $D_{2m,nT,w} \geq 33$ dB.

4. TERMOS DE ADAPTAÇÃO ESPETRAL

O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios prevê, em algumas situações, a utilização de termos de adaptação espectral. Assim, sempre que a área translúcida da fachada em ensaio seja superior a 60% do elemento de fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação apropriado, C ou C_{tr} , conforme o tipo de ruído dominante na emissão.

Uma vez que os termos de adaptação espectral são tipicamente negativos, a sua utilização pode afetar o cumprimento dos requisitos regulamentares de isolamento.

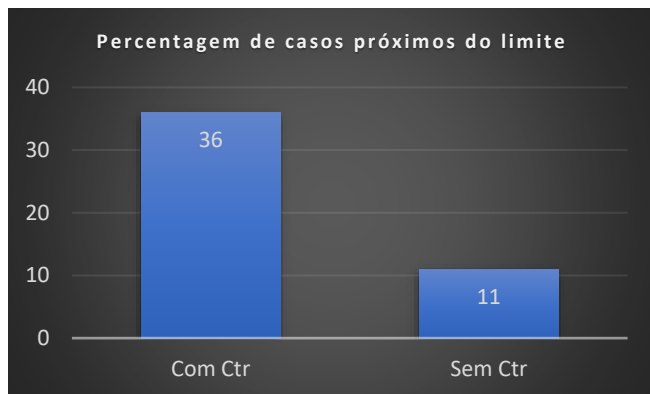


Figura 2. Percentagem de casos próximos dos valores limite, em função da utilização de C_{tr} .

No conjunto de situações analisadas, os termos de adaptação espectral eram aplicáveis em 14 situações, cerca de 16% do total, por se verificar que a área translúcida da fachada em ensaio era superior a 60% de toda a fachada em análise. Nestes casos, foi sempre utilizado o C_{tr} , dado as fachadas serem maioritariamente expostas a ruído de tráfego.

Verificou-se que, em 5 das situações analisadas, os resultados não permitiam cumprir o limite legal para zonas mistas, de 33 dB para moradias, ou ficavam muito próximo do limite, de 25 dB, para estabelecimentos comerciais.

Este resultado corresponde a cerca de 36% das situações em que eram aplicáveis os termos de adaptação espectral.

Analisando as situações em que os resultados não permitiam cumprir o limite legal para zonas mistas, de 33 dB para moradias, ou ficavam muito próximo do limite, de 25 dB, para estabelecimentos comerciais, em relação ao número total de situações analisadas, este resultado verificou-se em 10 dos ensaios efetuados, o que corresponde a cerca de 11% das situações.

Verifica-se assim que, nas situações em que a área translúcida da fachada em ensaio é superior a 60% de toda a fachada em análise e consequentemente devem ser utilizados os termos de adaptação espectral, a percentagem de situações próximas do limite legal para o isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas aumenta significativamente, no caso para mais do triplo dos ensaios, em percentagem, face à amostra de ensaios considerada.

5. INCERTEZAS ESTIMADAS POR BANDAS DE FREQUÊNCIAS

As incertezas estimadas por bandas de frequências foram calculadas para os ensaios em análise, utilizando a metodologia descrita na norma NP EN ISO 12999-1 e no Guia RELACRE 22 [5].

Os resultados obtidos foram comparados com as incertezas padrão associadas ao isolamento a sons aéreos, por

bandas de um terço de oitava, apresentados no quadro 2 da norma NP EN ISO 12999-1 para a situação *in situ*.

Tabela 2. Comparação dos valores de incerteza da norma NP EN ISO 12999-1, com os resultados obtidos nos ensaios.

Bandas de 1/3 de oitava	Valores da Norma 12999	Média de $u(D_{n,T,i})$	Mediana de $u(D_{n,T,i})$	Percentagem de valores inferiores à norma
100 Hz	2,8	2,3	2,1	80%
125 Hz	2,4	1,9	1,8	79%
160 Hz	2,0	1,8	1,5	73%
200 Hz	1,8	1,5	1,5	81%
250 Hz	1,6	1,4	1,3	71%
315 Hz	1,4	1,3	1,2	68%
400 Hz	1,2	1,3	1,1	63%
500 Hz	1,1	1,2	1,0	59%
630 Hz	1,0	1,2	1,1	39%
800 Hz	1,0	1,1	1,0	51%
1000 Hz	1,0	1,1	1,0	52%
1250 Hz	1,0	1,1	1,0	50%
1600 Hz	1,0	1,1	1,0	50%
2000 Hz	1,0	1,1	0,9	58%
2500 Hz	1,3	1,0	0,9	83%
3150 Hz	1,6	1,0	0,9	94%

Em termos gerais verifica-se uma boa concordância dos resultados obtidos nos ensaios, com os valores apresentados na norma.

Para a maioria das bandas de frequências, verifica-se que quer a média quer a mediana se situam abaixo ou muito próximo dos valores previstos na norma. A mediana tem uma melhor representação dos resultados, dado que a média pode ser enviesada pela ocorrência de valores pontuais anormalmente elevados.

A última coluna apresenta a percentagem de valores calculados para a incerteza por bandas de terço de oitava que são inferiores ou iguais aos valores previstos na norma. Verifica-se que, em algumas bandas de frequências, particularmente nas frequências médias, concretamente nas bandas de frequências de 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz e 1600 Hz, apenas cerca de 50% dos valores se situam abaixo dos valores da norma.

No gráfico 4 apresentam-se os resultados obtidos para a banda de frequências de 630 Hz, onde se obteve a menor percentagem de valores que cumprem a norma. Verifica-se que grande parte dos valores acima do valor da norma se situam pouco acima deste. No entanto, em algumas situações pontuais, obtiveram-se valores significativamente superiores ao valor da norma, sendo que em seis das situações os valores são mesmo superiores ao dobro do valor previsto na norma.

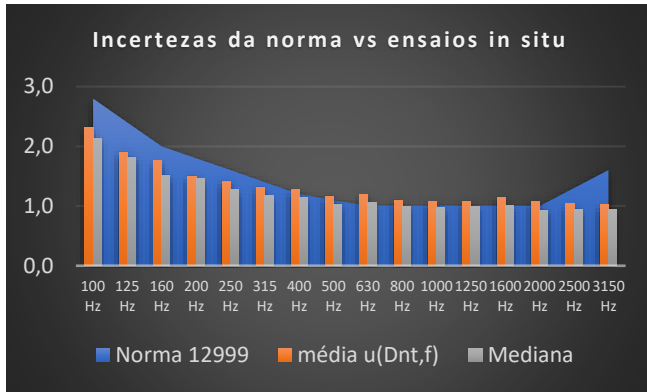


Figura 3. Comparação dos valores da norma com os valores obtidos nos ensaios *in situ* [dB].

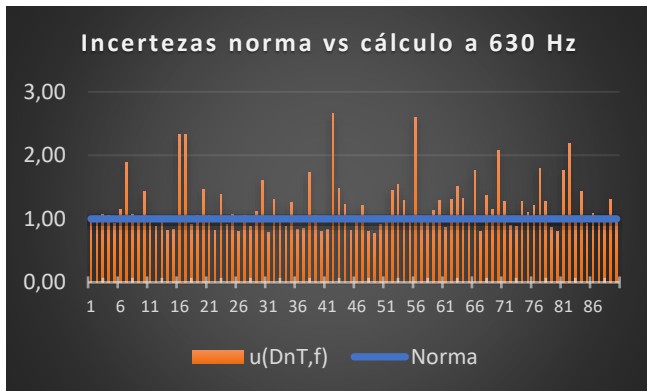


Figura 4. Comparação dos valores da norma com os valores obtidos nos ensaios *in situ*, para a banda de 630 Hz [dB].

Analisando os quatro ensaios correspondentes aos valores de incerteza mais elevados para a banda de 630 Hz, com valores de 2,65, 2,6, 2,3 e 2,3 dB, verifica-se que, em todos os casos, se trata de ensaios de isolamento sonoro de fachadas de espaços comerciais. Verifica-se também que ocorreram dispersões elevadas, quer nas medições de ruído recebido, L_2 , quer nas medições de ruído de fundo, B_2 , como é perceptível nos gráficos seguintes.

Estas dispersões justificam os valores de incerteza mais elevados e poderão relacionar-se com uma maior dificuldade de realização das medições em espaços comerciais, quer por possuírem mais ocupação por mobiliário, quer por se tratar de espaços com maior reverberação, o que também se verificava, nas medições de tempo de reverberação.

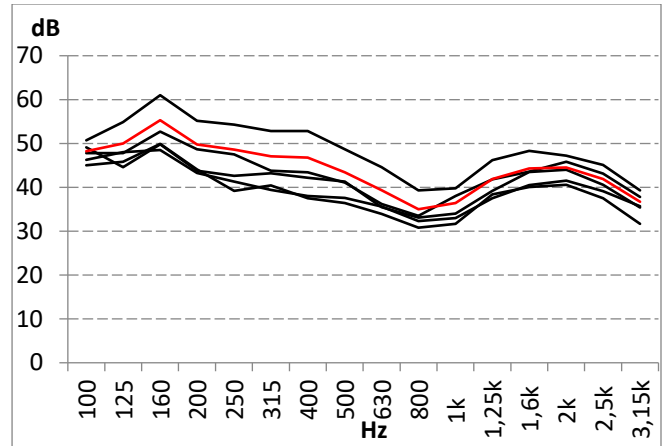


Figura 5. Dispersões de valores nas medições de ruído recebido, L_2 , num dos ensaios com maiores incertezas.

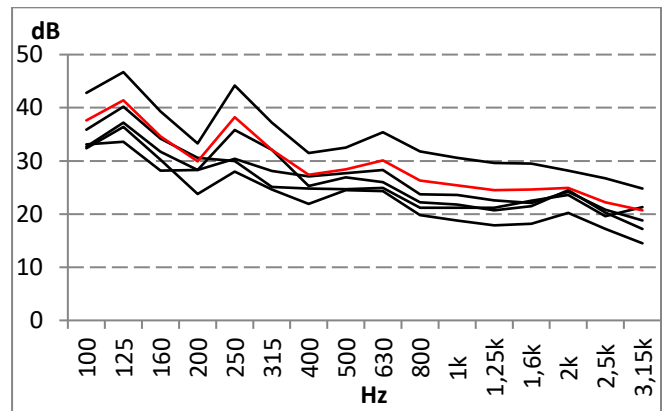


Figura 6. Dispersões de valores nas medições de ruído de fundo, B_2 , num dos ensaios com maiores incertezas.

6. INCERTEZAS ESTIMADAS PARA O ÍNDICE DE ISOLAMENTO

O Anexo B da norma NP EN ISO 12999-1 apresenta uma metodologia que permite calcular os valores de incerteza associados aos índices de isolamento sonoro, a partir dos valores de incerteza determinados por bandas de frequências.

Este método baseia-se em admitir uma correlação total entre os isolamentos obtidos por bandas de terços de oitava. Assim, todas as incertezas são adicionadas aos isolamentos sonoros medidos por bandas de terços de oitava, sendo determinado um índice de isolamento. Em seguida, todas as incertezas são subtraídas aos mesmos isolamentos sonoros medidos por bandas de terços de oitava e determinado um novo índice de isolamento. A incerteza padrão associada ao valor do índice de isolamento será a média destes dois índices assim obtidos.

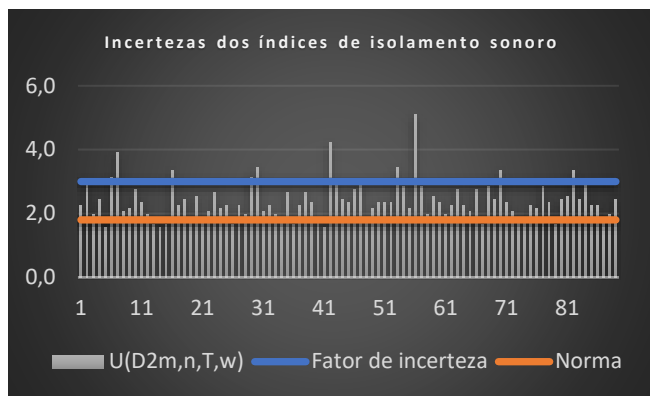


Figura 7. Comparação dos valores da norma com os valores obtidos nos ensaios *in situ*, para a incerteza associada aos índices de isolamento sonoro, $D_{2m,n,T,w}$ [dB].

A norma NP EN ISO 12999-1 aponta para uma incerteza padrão associada ao valor do índice de isolamento de 0,9 dB, ou seja 1,8 dB para a incerteza expandida, considerando um fator de expansão de 1,96, para um nível de confiança de 95%.

Neste caso, os resultados obtidos nos ensaios *in situ*, aplicando a metodologia acima descrita, de acordo com a norma NP EN ISO 12999-1, originaram valores um pouco superiores aos preconizados pela norma.

De facto, o valor médio obtido entre todos os ensaios analisados foi de 2,4 dB, sendo a mediana de 2,3 dB, valores um pouco mais elevados do que o valor expectável de 1,8 dB.

Dos ensaios analisados, apenas em cerca de 16% dos casos se obtiveram valores de incerteza para o índice de isolamento sonoro inferiores ou iguais a 1,8 dB.

Uma explicação possível para esta diferença pode ser o facto de que os valores da norma se baseiam nos resultados de Comparações Interlaboratoriais, em que tipicamente os ensaios são todos realizados nas mesmas situações e no mesmo local. Nestes casos práticos, comparam-se valores de incertezas estimadas para um conjunto de ensaios, todos realizados em diferentes situações e locais, o que justifica a obtenção de valores um pouco mais elevados.

7. CONCLUSÃO

O Decreto-Lei 96/2008, que aprova o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios define a aplicação de um fator de incerteza, a considerar na avaliação de conformidade dos ensaios previstos. No caso dos ensaios de isolamento sonoro, esse fator de incerteza tem o valor de 3 dB e deve ser adicionado ao valor medido de $D_{2m,n,T,w}$, o que corresponde à regra de decisão a aplicar na avaliação de conformidade.

Considerando os resultados obtidos para estes ensaios *in situ*, verifica-se que a grande maioria dos valores de incerteza calculados se situa abaixo de 3 dB. De facto, apenas em cerca

de 12% das situações caracterizadas se obtiveram valores superiores a 3 dB. Se considerarmos o número de casos com incerteza inferior a 3,2 dB, estes representam apenas cerca de 8% da totalidade de ensaios analisados.

Deste modo, a utilização do fator de incerteza de 3 dB, adicionado ao índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea de fachadas, como regra de decisão na avaliação de conformidade deste tipo de ensaios de isolamento sonoro, permite assegurar que está a ser utilizado um fator de incerteza adequado à maioria significativa das situações reais, tal como se encontram na prática.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Decreto-Lei 96/2008, de 9 de junho, que aprova o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.
- [2] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – NP EN ISO 16283-3:2017 – Acústica. Medição *in situ* do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 3: Isolamento sonoro de fachadas.
- [3] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – NP EN ISO 717-1:2021 – Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea.
- [4] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – NP EN ISO 12999-1:2023 – Acústica. Determinação e aplicação das incertezas de medição em acústica de edifícios. Parte 1: Isolamento sonoro.
- [5] RELACRE - Guia RELACRE 22 - Cálculo de Incertezas - Acústica de Edifícios. Volume I. Setembro de 2021.

TRANSMISIÓN DE RUIDO Y VIBRACIONES VÍA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO: POSIBLES SOLUCIONES

Alfonso Corz^{1*}
Juan Negreira²
Andrés L. Peña³

¹Presidente AECOR / Chairman Calpe Institute of Technology

²Secretario AECOR / Technical & Marketing Manager Saint-Gobain Ecophon Iberia

³Calpe Institute of Technology

RESUMEN

Uno de los mayores problemas a la hora de realizar el cambio de la antigua CA-88 al actual CTE-DB HR, fue la diferencia tan abultada de la limitación de la transmisión por impacto. Una vez dado ese paso, hoy tenemos que ver que aún estamos lejos de los valores de los países de nuestro entorno. Aun siendo el ensayo de impacto una norma importante con una metodología muy probada, surge la pregunta de qué sucede con otra serie de fenómenos vibratorios que aparecen en las edificaciones y que producen molestias a los habitantes de dichos inmuebles. Se pretende dar aquí una visión más amplia de estos fenómenos y su posible solución.

ABSTRACT

One of the most common issues when moving from the abrogated CA-88 to the current CTE-DB HR, was the highly increased limitation for impact noises transmission. Once this path was taken, it is still clear our results are far from what other surrounding countries have achieved. Even considering the impact noise test method importance and its widely proven methodology, a question arises about what happens with another series of vibrating phenomena that are present at buildings causing annoyances to their inhabitants. We intend to show a wider vision about these phenomena and feasible solutions.

Palabras Clave— ruido de impactos, transmisión estructural, soluciones constructivas.

1. INTRODUCCIÓN

La propagación de ondas entre el emisor de estas y el receptor necesita de un medio deformable entre ambos. El medio de

transmisión puede ser un sólido, un fluido o una combinación de ambos, y el foco puede ser un generador de ondas acústicas o bien un generador de vibraciones. Cuando la combinación es fuente acústica → fluido → receptor, el problema es bien conocido y, si bien tiene sus problemas, es el caso más definido por la normativa y simple conceptualmente.

En la transmisión por vía aérea entre dos recintos, el sonido viaja a través del aire, llega a un paramento sólido, pierde una cierta cantidad de energía, refleja otra parte al interior, y la onda se transmite a través del paramento sólido al interior del espacio donde está el receptor. Para atenuarlo, se puede actuar sobre el foco o aumentar el aislamiento del paramento, esto es, en la parte sólida del camino de propagación.

En el caso de los focos vibratorios, sin embargo, no se produce necesariamente un ruido aéreo de forma directa. La vibración se transmite al medio elástico, como puede ser la estructura de un edificio, a través de puntos de contacto, provocando que vibre la estructura en sí. Esta vibración viaja por la estructura con una atenuación relativamente más baja que en el caso de la transmisión aérea, produciendo que los paramentos verticales y horizontales se comporten como membranas que, al vibrar, producen un ruido aéreo que llega al receptor.

El grado de complejidad de este fenómeno es grande mientras las ondas viajan por la parte sólida, adentrándonos en el mundo de la propagación de ondas sísmicas con ondas tipo P y S. El enfoque que se le ha dado al problema es simplificarlo, como en el caso de la máquina de impacto normalizada (norma UNE-EN ISO 16283-2). De forma experimental se mide y comparan los niveles de ruido que llegan al receptor teniendo un emisor de vibraciones normalizado, aunque el medio sólido (estructura) por donde se propagan las ondas no sea conocido.

Las soluciones para resolver problemas de ruido trans-

* **Autor de contacto:** juan.negreira@saint-gobain.com

Copyright: ©2023 Juan Negreira et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

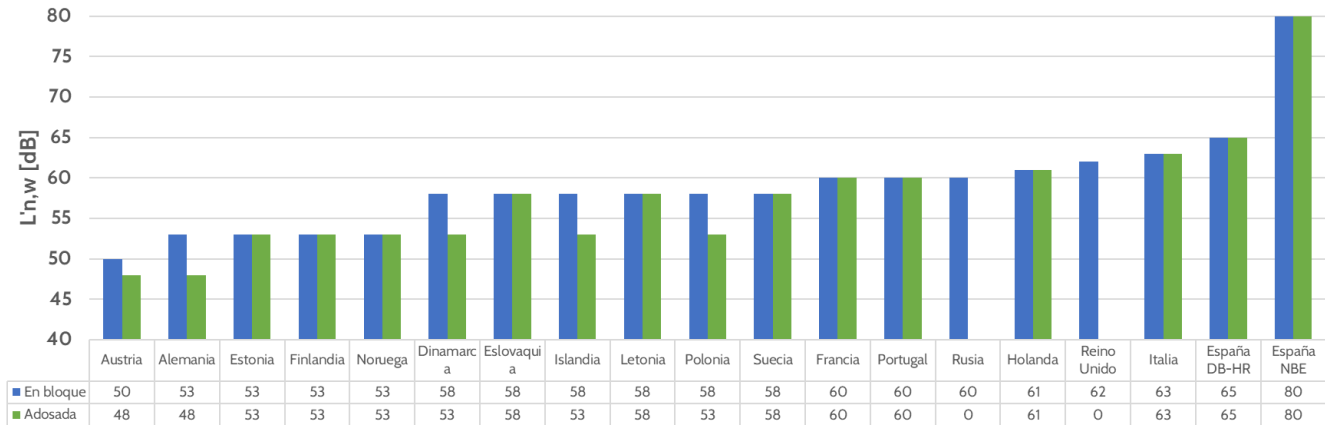


Figura 1. Requisitos generales de nivel máximo de ruido de impactos entre recintos de diferentes usuarios, edificios de más de 1 planta, estimación de niveles equivalentes en $L'_{n,w}$ en 2008. Elaboración propia AECOR.

mitido por vía estructural son más efectivas cuando se centran en el foco, esto es, evitando que se produzca la transmisión a la estructura del edificio. Las soluciones tradicionales pasan por desolidarizar el foco vibratorio de la estructura del edificio, puesto que una vez que se produce la transmisión, mitigar la afección es una tarea por lo general sumamente complicada.

La transmisión de ruido de impactos sigue siendo una tarea pendiente en las edificaciones residenciales en España, pese a la mejora en requisitos que supuso el DB-HR [1], que sigue siendo baja en comparación con otros países europeos (en la figura 1 se muestra que con el requisito del DB-HR, España seguía a la cola de Europa en cuanto a exigencia en nivel de ruido de impactos). Además, sigue existiendo cierto desconocimiento de este fenómeno tan complejo por parte de los agentes implicados, siendo habitual que se adopten soluciones erróneas o poco eficaces para mitigar este tipo de molestias (como aumentar el aislamiento acústico de paramentos, lo que no tiene efecto alguno sobre la transmisión estructural).

La principal novedad a efectos prácticos del DB-HR en cuanto a transmisión de ruido de impactos es la necesidad implícita de emplear suelos flotantes, en los que se desolidariza la solería de la estructura mediante el empleo de láminas anti impactos. Lo anterior supone una importante evolución sobre las soluciones constructivas que se han venido empleando en España tradicionalmente [2].

Aunque se han producido notables mejoras en el diseño de equipos e instalaciones desde la aprobación del DB-HR tendentes a reducir el impacto acústico y vibratorio de las mismas, el aumento de la complejidad en diseños e instalaciones ha causado la aparición de nuevos retos a solventar. Ejemplos de lo anterior pueden ser la instalación de piscinas y depósitos en plantas superiores o cubiertas en edificios de gran altura, ascensores que operan a altas velocidades, o el paso bajo o próximo a los cimientos de trenes subterráneos.

Resolver problemas de transmisión estructural una vez que se manifiestan puede ser una tarea compleja, costosa e ineficiente. Por tanto, el diseño de soluciones específicas e innovadoras a estos retos es crucial para garantizar la habitabilidad y confort en edificios residenciales una vez que estén construidos.

A continuación, se presentan algunos casos de este tipo de problemas de transmisión de ruido por vía estructural, así como soluciones innovadoras, diferentes al planteamiento tradicional.

2. GIMNASIOS

Es cada vez más habitual que en edificios residenciales se incluyan estancias de servicios comunitarios, siendo frecuentes los espacios destinados al ejercicio físico.

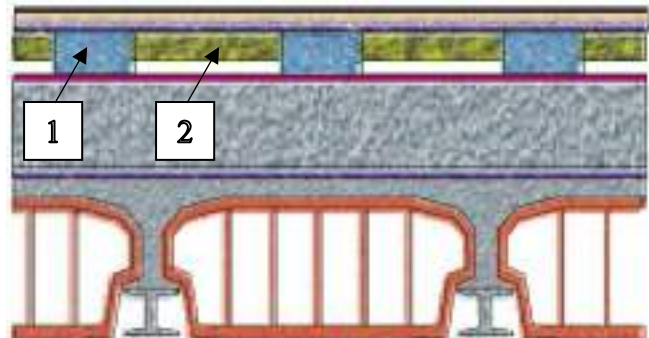


Figura 2. Detalle de una solución constructiva basada en cojines de acero trenzado (1) rodeados de lana mineral (2) bajo la solería, montado sobre el forjado existente, para un gimnasio.

En edificios residenciales, los suelos flotantes se diseñan para el uso previsto, y por tanto los usos no esperados pueden producir transmisión de ruido estructural. Cuando se instala un gimnasio en un edificio residencial empleando suelos flotantes tradicionales, se producen impactos que generan niveles muy superiores a los que estos suelos son ca-

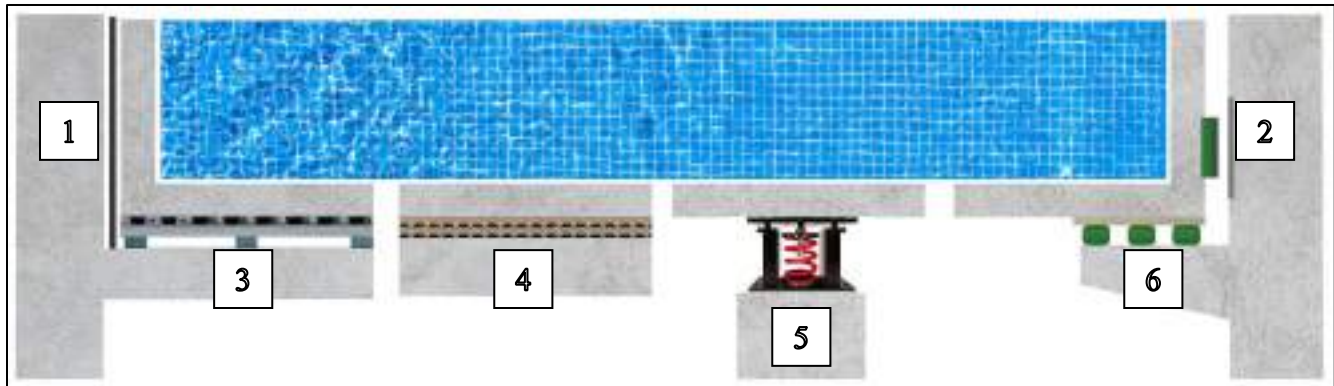


Figura 3. Diferentes soluciones para desolidarizar vasos de piscinas: 1) Bandas elásticas continuas, 2) núcleos elásticos discretos, 3) losas con apoyos elásticos/amortiguadores discretos, 4) paneles elásticos continuos, 5) amortiguadores precomprimidos para altas cargas, y 6) apoyos elásticos discretos para altas cargas.

paces de atenuar, requiriendo soluciones específicas.

El problema se debe a que las soluciones basadas en láminas elásticas anti-impactos tienen un rango de operación concreto, pasado el cual pasan a comportarse como un sólido con elasticidad no lineal limitada. La parte inicial de la energía del impacto es absorbida por el elemento anti vibratorio, pero el resto es transferido a la estructura.

Tanto las máquinas de ejercicio como las pesas y mancuernas al caer requieren que el suelo flotante cuente con elementos anti vibratorios adaptados a dichas cargas. Para ello, se suelen emplear sistemas basados en muelles distribuidos en malla bajo la losa que soporta la solería, cuidando que no haya contacto rígido en rodapiés, además de contar con acabados elásticos sobre la solería para reducir la generación de ruido aéreo.

3. DEPÓSITOS Y PISCINAS EN PLANTAS ALTAS DE EDIFICIOS RESIDENCIALES

Los depósitos de grandes o pequeñas dimensiones instalados en las cubiertas de los edificios no son una fuente de vibraciones per se, pero durante el proceso de vaciado y llenado pueden producirse eventos de transmisión estructural, como el denominado “golpe de ariete”: un repentino aumento de la presión en las tuberías que se produce por cambios rápidos en la velocidad del caudal. Este fenómeno, que en casos extremos puede producir roturas en las tuberías, uniones y bombas, es bien conocido y puede ser resuelto mediante soluciones estándares.

El caso de las piscinas en plantas altas presenta una mayor complejidad. Se puede considerar que una piscina es un depósito abierto, estando por tanto sujeto a los mismos riesgos de transmisión de ruido estructural que cualquier otro depósito, pero además presenta otras casuísticas de interés. Por una parte, se trata de masas de gran importancia, que tienen un papel importante en caso de sismos, y que por tanto requieren estudios muy detallados. Sin embargo, se suele obviar que el uso de la piscina por parte de personas produce

eventos de impacto que se transmiten a la estructura del edificio.

Desolidarizar un grupo de presión, como el sistema de bombas que da servicio a la piscina, es una tarea bien conocida: empleando uniones flexibles en las tuberías, e instalando los equipos en una bancada con apoyos elásticos. Sin embargo, desolidarizar la totalidad de la piscina de la estructura requiere de sistemas antivibratorios muy complejos, debido a las cargas que deben soportar.

Esto implica que el vaso de la piscina no tenga contactos rígidos con la estructura, y esté sobre una bancada con apoyos elásticos, de forma similar a lo que se ha expuesto para los gimnasios, pero a una escala mayor. Existen múltiples soluciones específicas para este tipo de problemas [3].

Alcanzado un cierto umbral de carga, las soluciones basadas en láminas anti-impactos no son viables, puesto que sometidas a carga excesiva pasan a comportarse como un sólido semi-rígido. En su lugar, se emplean amortiguadores diseñados de forma específica para la carga que han de soportar, y se distribuyen bajo la bancada formando una malla que ayuda a distribuir los esfuerzos. Estos amortiguadores pueden ser bloques de elastómeros, muelles, o una combinación de ambos, y deben instalarse bajo el vaso y también en los laterales.

4. ASCENSORES

Los ascensores están formados por múltiples e importantes focos de vibraciones que se pueden transmitir por vía estructural: el grupo tractor, las guías de la cabina, las puertas automatizadas, los cables, el sistema de frenado, e incluso el propio sistema de control.

En ascensores antiguos, el grupo tractor suele ser la principal fuente de vibraciones que produce transmisión estructural hacia viviendas colindantes [4]. Una bancada inadecuada o unos apoyos rígidos en exceso producirán la transmisión estructural que se pretende evitar. La circulación de la cabina durante la operación del ascensor produce

vibraciones en las guías, que deben instalarse mediante sujeciones elásticas. Los cables, en especial en ascensores de alta velocidad [5], son otra fuente de vibraciones adicional, que puede transmitirse a la propia cabina y al grupo tractor, excediendo la capacidad de atenuación para la que se han diseñado los apoyos elásticos de estos componentes.

Los sistemas de control basados en relés ofrecen la ventaja de no requerir la existencia de una sala para el grupo tractor, pero su operación produce eventos vibratorios en el armario, que por lo general no se diseña para evitar la transmisión estructural.



Figura 4. Apoyos elásticos instalados a posteriori en el grupo tractor de un ascensor tradicional. Se aprecia en la esquina inferior derecha que el sistema paracaídas no dispone de apoyos, creando un punto de transmisión de vibraciones a la estructura.

Los fabricantes son conscientes de este problema, y han desarrollado nuevos equipos que reducen sensiblemente sus vibraciones, por lo que han ido solventado este tipo de problemas, de tal forma que la modernización termina siendo la solución más simple y efectiva. Los grupos de tracción sin engranajes (gearless) emplean motores síncronos dotados de imanes permanentes que, sobre todo, descartan el uso de reductor. Esto reduce los puntos de fricción, ofrecen un menor consumo energético, y logran unas emisiones acústicas y vibratorias notablemente inferiores a los tradicionales. En casos donde el grupo tractor es el principal foco de vibración, la sustitución por uno de estos equipos gearless es la opción más efectiva, en lugar de instalar nuevos apoyos elásticos. De la misma forma, la sustitución de relés antiguos por sistemas de control modernos es la manera más simple de solventar este otro problema. La reducción de vibraciones produce además un mayor confort en la cabina.

5. FERROCARRILES

Los efectos de la vibración de ferrocarriles están ampliamente estudiados, pero existe un fenómeno menos conocido fuera del ámbito ferroviario que es el de la corrugación o desgaste ondulatorio, uno de los principales costes del mantenimiento de la infraestructura, suponiendo entre un 25 y 30% de estos

costes, y al que son especialmente sensibles los ferrocarriles/tranvías/metros en entornos urbanos [6].

Este fenómeno consiste en la aparición de un desgaste en el carril con forma de onda, que una vez que surge aumenta de forma exponencial. Es más frecuente en curvas con radios bajos (que son más habituales en metros y tranvías [7] que en medias y largas distancias fuera de núcleos urbanos), y se debe a la interacción entre las frecuencias naturales del bogie y del raíl.



Figura 5. Desgaste ondulatorio en un raíl.

Las causas que lo generan son complejas y en ocasiones múltiples, existiendo gran variabilidad, y dependiendo en gran medida de las condiciones específicas en cada caso –tipo de vía, tipo de elementos, geometría de vía, características de las circulaciones, velocidades, cargas, etc. Sí es conocido que en el mecanismo cíclico que ocasiona este fenómeno el estado de cargas está dominado por efectos resonantes de la vía, de tal manera que el desgaste viene caracterizado por una longitud de onda característica, dejando una huella que se repite con un patrón regular.

El paso de trenes por un carril corrugado produce un mayor coste energético, vibraciones hacia el vagón y por el terreno circundante, así como un incremento en el nivel de ruido generado. Las soluciones tradicionales consisten en la reducción de la fricción del raíl mediante la aplicación periódica de lubricantes, y una vez que surge el desgaste, el amolado del raíl o incluso su sustitución en casos de desgaste extremo.

Es un fenómeno complejo, pero existen propuestas que minimizan el riesgo de aparición del desgaste mediante la modificación de la rigidez de sujeciones, apoyos y raíl y/o la distancia entre traviesas, de tal forma que se desacoplan los modos naturales del bogie y el raíl, reduciendo así el riesgo de que surja el desgaste, y por tanto que se produzca la transmisión de vibraciones al terreno, y de ahí a los edificios del entorno.

Esto permite que, bien en fase de diseño, bien durante las operaciones de sustitución de traviesas y raíl, la reconstrucción de la vía se realice de tal forma que se minimice el riesgo de aparición del fenómeno, actuando de esta forma sobre el foco con un planteamiento distinto al tradicional.



Figura 6. Optimización mediante algoritmo de la función de respuesta en frecuencia. La situación inicial (rojo) presentaba una coincidencia con la frecuencia de torsión del bogie (verde) a 200Hz. El algoritmo logra disminuir la amplitud de respuesta del raíl en la frecuencia de control (naranja), mediante la reducción de la distancia entre traviesas y de la densidad del hormigón de estas.

6. CONCLUSIONES

La transmisión por vía estructural es un problema tan complejo, que la única solución viable, a efectos prácticos, es evitar que se produzca la propia transmisión de la vibración desde el foco hasta la estructura.

Si bien los límites de nivel de ruido de impactos son más restrictivos tras la entrada en vigor del CTE, siguen siendo exigencias a la cola de Europa, y no se aplican a la mayor parte del parque de viviendas ya construidas con anterioridad.

La transmisión de ondas por vía estructural sigue siendo un fenómeno poco conocido para gran parte de los agentes implicados en la construcción, por lo que hoy en día es habitual que el diseño, la instalación o el mantenimiento de focos vibratorios de forma adecuada, no se realice de forma adecuada y que se apliquen soluciones ineficaces.

Conociendo la naturaleza del fenómeno, la solución no siempre es compleja: una bancada adecuada, unos soportes de elastómero, o unas sujeciones elásticas pueden ser

soluciones apropiadas. Sin embargo, cuando los focos vibratorios son complejos o de alto nivel de emisión, suele ser necesario abordar el problema con planteamientos no tradicionales, con diseños innovadores, y con soluciones basadas en enfoques originales.

7. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Fomento, «DB HR - Protección frente al ruido», *Código técnico de la Edificación*, vol. 2013, 2019.
- [2] M. T. Carrascal García, A. Romero Fernández, y M. B. Casla Herguedas, «The evolution in the sound insulation of Spanish floors. Typical performance and their potential for improvement», en *INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 2019.
- [3] T. Murray, L. Cosstick, E. Hong, y G. Hall, «Comparison of pool isolation systems», en *24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*, 2017.
- [4] P. Xu *et al.*, «Experimental study on damping characteristics of elevator traction system», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 14, n.º 3, 2022, doi: 10.1177/16878132221085434.
- [5] Q. Zhang, Y. H. Yang, T. Hou, y R. J. Zhang, «Dynamic analysis of high-speed traction elevator and traction car-rope time-varying system», *Noise and Vibration Worldwide*, vol. 50, n.º 2, 2019, doi: 10.1177/0957456519827929.
- [6] S. L. Grassie, «Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments», *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*, vol. 223, n.º 6, pp. 581-596, 2009, doi: 10.1243/09544097JRRT264.
- [7] A. Bracciali, «Rail Corrugation Growth in a Metro Curve», *Methodology*, 2006.

AIRTIGHTNESS /AIRBORNE SOUND INSULATION STUDY IN ACCREDITED SOUND INSULATION FACILITIES

Ahmed Elsaei^{1*}, Alberto Meiss¹, Irene Poza-Casado¹, Jairo González², Miguel A. Padilla-Marcos¹, Ana Espinel², María Machimbarrena³

¹GIR Arquitectura & Energía; Universidad de Valladolid

²AUDIOTEC

³ Departamento de Física Aplicada; Universidad de Valladolid

ABSTRACT

The potential relation between airtightness and acoustic performance of constructive solutions is not yet well known and described, although it has been widely proved that both phenomena have strong links.

The objective of this research is to provide additional experimental knowledge in this field of research, working in a controlled environment, thus reducing the number of variables affecting both acoustic performance and airtightness.

The test specimen is a hollow tongue and groove brick with mortar rendering wall. The acoustic performance of the original test specimen has already been tested in AUDIOTEC's accredited sound transmission facilities. The research consists in gradually making holes on the test sample and evaluating airtightness and airborne sound insulation as the amount of "leaks" increases. Airtightness has been measured with a blower door test and the sound insulation has been measured using AUDIOTEC's instruments and facilities.

Palabras Clave— airtightness and sound insulation, air leakage, indoor comfort, air infiltration

1. INTRODUCTION

There are four basic aspects related to the comfort inside a building: acoustic, lighting, hydrothermal, and air quality. Three of these aspects are undoubtedly affected by air leakages in the building: the acoustic, the hydrothermal and the air quality performance of the building.

The most common method for measuring the airtightness of buildings is the pressurization test, also called Blower Door test[1] This test is based on the air permeability law of flow through an orifice which is given by:

$$Q = C \cdot \Delta p^n \quad (1)$$

Where Q is the measured air flow in m^3/h , Δp is the pressure difference measured between both sides of the envelope, C is the air leakage coefficient and n are related to the shape of the hole or kind of airflow (laminar or turbulent) and ranges between 0.5 to 1.

By using the blower door device Δp and Q are measured simultaneously under different pressure differences ranging from 4 Pa to 80 Pa. After that, by plotting both parameters, C and n can be calculated from the graph. Finally, the air leakage can be normalized using either the entire building volume, that is, the air change rate ($n50$), or by the envelope area, that is, the specific leakage rate ($Q50$).

Despite this method's popularity, it has some disadvantages that make it more complicated to implement in some situations. For instance, for testing airtightness in large buildings several fans shall be used and/or the building shall be divided into zones to be studied independently. Also, it is very sensitive to weather conditions such as wind speed and temperature difference, although there are ISO guidelines on how to avoid the temperature influence. Furthermore, it cannot detect the leak's location and only allows quantifying the airtightness of the envelope. To overcome this drawback, there are different methods which are usually combined with

* **Autor de contacto:** ahmedelsaei@uva.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

pressurization tests, such as IR thermography or fog generators.

One of the motivations of this study is to investigate alternative methods to locate and possibly quantify air leaks using acoustic measurements. Since acoustic measurements are performed under natural conditions, no external circumstance (forced pressure difference) would alter the configuration of the envelope elements, thus introducing less sources of error related to this. Besides, the pressurization tests do not include the airtightness of the door where the Blower Door is placed and for the acoustic tests the door would also remain unaltered.

In spite of the fact that it is very intuitive that there must be a relation between air infiltration/airtightness in buildings and the corresponding sound insulation, there are very few studies focused on the relation between both phenomena. Some researchers have aimed at identifying or even quantifying the air leakage size using different acoustic methods, but although it is agreed that both phenomena are related, the subject is not simple and further research is required.

Kölsch B[2] introduces an acoustic beamforming method for detecting leakage locations using microphone arrays using a white noise source with a frequency range of 1-25 kHz. It is observed that sufficiently large leaks are detected over the full frequency range whereas, as the size of the leak decreases, it becomes detectable only at higher frequencies. In this paper it is shown that the acoustic camera in the form of an acoustic beamforming method can be used for detecting and making a very rough estimation of leaks' sizes in the building envelope. Aiming at improving the detection and quantification of air leakages by acoustics measurements, Kölsch B [3] designed a perfectly sealed scale model transmission chamber where different material configurations and openings could be installed between the two spaces. For the acoustic measurements, the author used an ultrasonic dynamic sound source and ¼ inch microphones and the airflow was measured with a Venturi meter installed between and external blower and the chamber. The pressure difference between both chambers was also measured. With this set up, and based on 26 different wall conditions, it was concluded that an estimate of the magnitude of the airflow could be obtained, but again, further research was found necessary.

Other relevant research on this field was performed by Iordache et al, [4]–[6] both under laboratory and in field conditions. The first research on windows in field conditions [4] found, for specific sound pressure levels, differences between in and out and for a specific type of double wood-frame window, that an empirical equation can be used to estimate the air change rate at 4 Pa. The studies they performed under laboratory conditions [5] comparing eight different types of openings on nine different types of windows, concluded again that both phenomena are correlated and that, in certain cases, the infiltrated airflow

could be determined as a function of the global weighted noise level difference ΔLA . Their last study [6] was performed in the same in situ scenario as the first one [4] but with single wood-frame windows and with some refurbishment in the inside of the room. In this case, a different empirical equation was found, which could be used to estimate the air change rate. The very good results found are limited to the specific cases of study, that is, double wood-frame and single wood-frame respectively.

It is thus clear that there is some kind of correlation between airtightness, airflow rate, estimated leakage area and the acoustic performance of a wall, but there are so many potential variables affecting this relation that much more theoretical and experimental research is required to enlighten this field of research. Some of the aspects to study can be related to the shape and size of the leaks, to the material where leaks are located, to the cumulative size or position of the leaks within the wall... And bearing in mind the limitations of acoustic measurements to one single façade or test wall which will be difficult to translate into a full building.

In this context, this study aims at further investigating the relationship between airtightness and airborne sound insulation under a controlled environment where only one variable (opening size) will be modified gradually. The objective of this study is to evaluate the airtightness and acoustic performance of a solid and sealed wall by making successive controlled holes under laboratory conditions.

This is considered the first of a series of experimental studies which will be programmed according to the results of this study.

2. METHODOLOGY

In order to study airtightness and acoustic performance under the same conditions, a sample wall has been mounted in an accredited airborne sound insulation laboratory, that is between two acoustically independent rooms. The sample wall has then been gradually drilled as explained hereinafter. Acoustic and airtightness tests have been performed according to the corresponding standards.

2.1. Laboratory, equipment, and sample description

All measurements were carried out at AUDIOTEC's airborne sound insulation accredited laboratory.

For the acoustic measurements, AUDIOTEC's equipment was used, and measurements were made according to ISO 10140-2 [7] using two different source positions in the source room and a rotating boom both in the source and receiving room. Besides the standardized descriptors found in the literature (R_w , C , C_{tr} , R_A), the A-weighted sound pressure level difference will be calculated according to equation (2)

$$\Delta LA = L1A - L2A \quad (2)$$

where L1A and L2A are the average A-weighted sound pressure level values in the source and receiving room respectively.

The airtightness tests have been carried out by the fan pressurization method, commonly known as Blower Door, according to ISO 9972: 2015 [8]. The equipment used was the Minneapolis Blower Door MiniFan (5 m³/h - 2,300 m³/h), with serial number DB-CE2336. Pressure gauge DG-1000, with serial number 12547, was also used.

In this case, the airtightness test was done by generating a controlled pressure difference by placing a fan (blower door) at the door opening in the receiving room and leaving the door open in the source room. Each airtightness test consists of a set of seven semi-automatic measurements at different overpressures, 12, 20, 28, 36, 44, 52, and 60 Pa. Before each airtightness test, the fan opening was temporarily covered to measure the pressure difference between the inside and outside, recording zero-flow pressure difference values.

The measured sample is a wall separating the source and receiving room and previously placed on a mobile sample holder. The wall dimensions are 2.8 m in height and 3.6 m in width. The wall is built with extra big format hollow bricks plastered with 15 mm mortar on one side and 5 mm mortar on the other side. The bricks are joined together by tongue and groove joint, and rows are joined by a cementitious adhesive. The sides and the lower part of the sample are finished with cement mortar, while the upper one is with plaster as shown in Figure.1.



Figure 1. The wall in its original state before drilling any holes.

2.2. Measurement protocol

Since, as previously mentioned, the purpose of this research is to study the potential correlation between airtightness and sound insulation, all the acoustic and airtightness measurements will be performed under the same conditions described in the previous section but with different wall openings (drilled holes or controlled holes) situations. Hereinafter the different phases of the experimental work are described:

PHASE 0 or REFERENCE PHASE: Acoustic and airtightness measurement of the original wall without any artificial opening.

PHASE 1: Twenty-four holes are drilled sequentially. The size of the holes is 14 mm diameter, corresponding to 1,54 cm². Airtightness and sound insulation are measured after each new hole is made. The order in which the holes are drilled is duly numbered. When the 24 holes are drilled the calculated opening area (OA) is 37 cm² (Figure 2).

PHASE 2: All the holes are covered by a previously selected “plastic tap” (see Figure 3) which can be opened and closed on demand. In order to avoid potential leaks around the “taps”, the joints were properly sealed with an ad hoc putty. The diameter of the controlled holes in these taps is 6,7 mm, corresponding to 0,35 cm² calculated opening area. Starting from the situation “all tabs closed”, the tabs are opened following the same sequence as in PHASE 1 and airtightness and sound insulation are measured each time a new tap is opened. When the 24 controlled openings are open, the equivalent opening area (OA) is 8,5 cm².

PHASES 3 and 4: Two different opening patterns were selected in order to study if the position and total surface of the openings could provide additional information.

The results of PHASES 3 and 4 are not shown in detail in this study but have been used to elaborate Table 2.



Figure 2. The 24 drilled holes for PHASE 1 measurements



Figure 3. The 24 holes covered by a plastic controlled tap

3. AIRTIGHTNESS MEASUREMENTS RESULTS

Figures 4 and 5 represent the permeability curves corresponding to the tests performed in PHASE 0 (no holes), PHASE 1 (with 4, 8, 16, 20 and 24 holes) and PHASE 2 (with 0, 4, 8, 16, 20 and 24 taps open). The quantitative differences between both figures are due to the different size of the holes and the taps-controlled openings as mentioned in the previous section. In both figures the trend is as expected with increasing air leakage both as the pressure difference increases and as the number of holes (opening area) increases. The air leakage values are lower in PHASE 2 due to the smaller size of the taps-controlled openings.

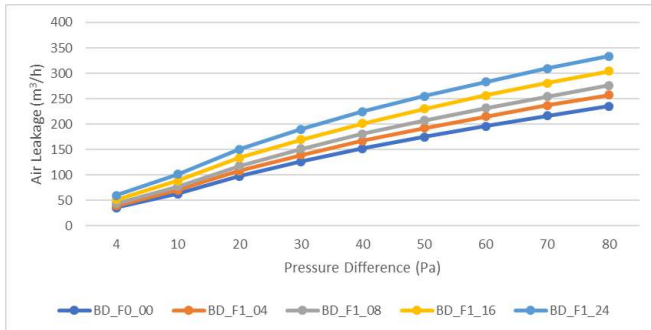


Figure 4. Permeability Curves for Phases 0 and 1

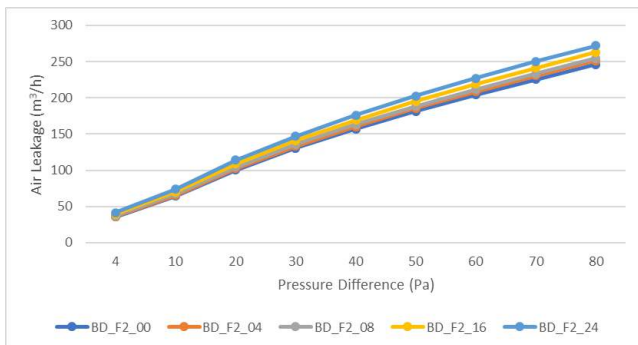


Figure 5. Permeability Curves for Phase 2

Figures 6 to 9 show the relation of Q50 (specific leakage rate under 50 Pa pressure difference) and n50 (air change rate under 50 Pa pressure difference) with the calculated opening area.

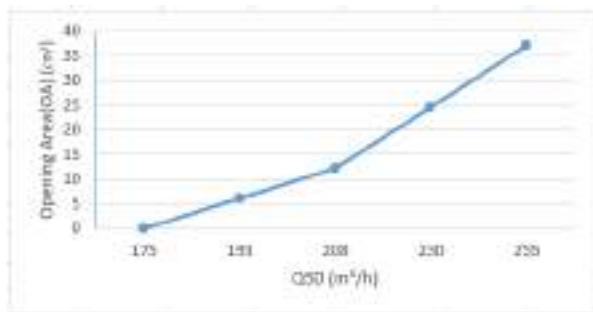


Figure 6. OA/Q50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 drilled holes

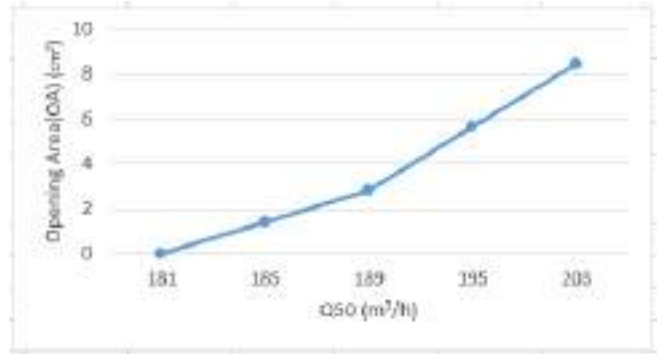


Figure 7. OA/Q50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 tap-controlled openings.

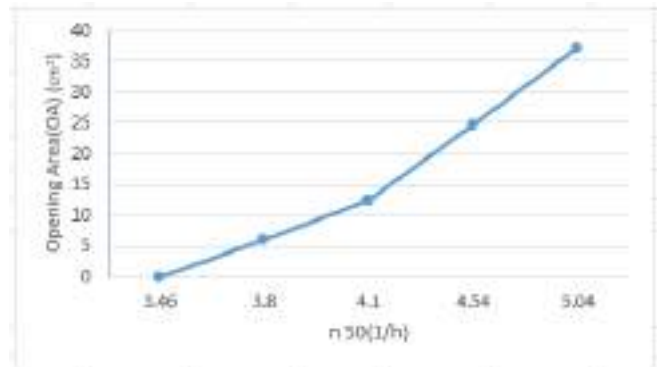


Figure 8. OA/n50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 drilled holes

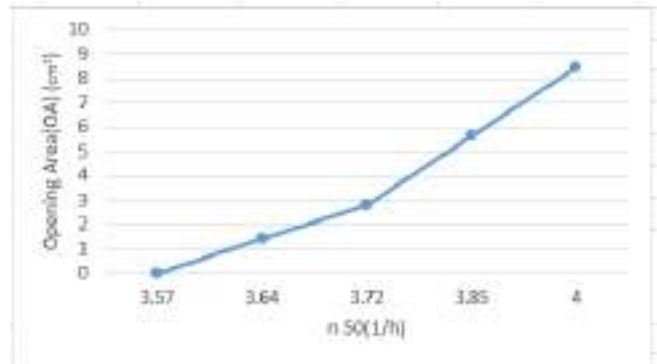


Figure 9. OA/n50 for 0, 4, 8, 16, 20 and 24 tap-controlled openings.

For PHASE 1 (figures 6 and 8), when all the 24 holes are drilled, the air leakage value is $Q_{50}=255 \text{ m}^3/\text{h}$, which corresponds to n_{50} approximately equal to 5, that is all the air inside the room is changed 5 times per hour.

For PHASE 2 (figures 7 and 9), when all the 24 tap-controlled openings are open, the air leakage value is $Q_{50}=203 \text{ m}^3/\text{h}$.

It is interesting to point out that if the “completely sealed conditions” in both phases are compared (0 openings) the corresponding Q_{50} and n_{50} values are approximately similar ($175 \text{ m}^3/\text{h}$ and 3.46 h^{-1} for PHASE 1 and $181 \text{ m}^3/\text{h}$ and 3.57 h^{-1} for PHASE 2). This small difference confirms the

successful installation of the plastic taps as far as airtightness is concerned and the possibility of performing tests with the taps closed as if no drill had been performed. The small difference is possibly due to very small leaks around the taps.

Concerning the exponent “n” in equation 1, if all the PHASES are considered, it has been found to vary between 0,57 and 0,67. Figure 10 shows the “n” values obtained for PHASE 1 with increasing number of holes. In this case “n” decreases from 0,63 to 0,57 as the number of holes increases from 0 to 24.

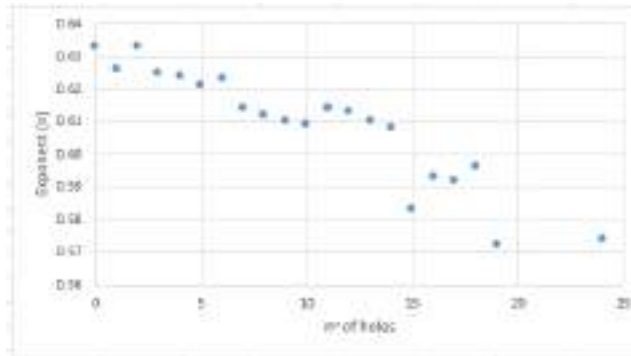


Figure 10. Variation of the Exponent n with the number of holes in PHASE 1.

4. ACOUSTIC MEASUREMENTS RESULTS

Prior to making the acoustic measurements it was expected to observe a decrease in airborne sound insulation as the number of openings was increased, just as an increase in airflow was clearly observed in the previous section.

Unfortunately, the acoustic experimental results have not shown the expected trend, as it is shown hereinafter.

As it can be seen in Tables 1 and 2, no significant difference has been found neither in R_w and other sound typical sound insulation descriptors nor in ΔLA , as the number of holes was increased. This was a surprising result because all acoustic descriptors remained almost invariable as the number of openings was increased. If a tendency was observed, it was in the opposite direction as expected (increasing R_w and ΔLA)! These results are puzzling and need a deeper analysis which will be undertaken in the future.

Table 1: Airborne sound insulation descriptors as a function of n° holes

n° holes	R_w	C	Ctr	RA	RA _{tr}
4	39	-1	-3	38,6	35,8
8	39	-1	-3	39	36,3
12	39	-1	-2	39,3	36,7
16	39	-1	-2	39,2	36,5
20	39	0	-2	39,5	36,9
24	39	0	-2	39,5	37

Table 2: ΔLA as a function of n° holes and OA

n° holes	OA (cm ²)	ΔL_e (dBA)
0	0	36.6
4	1.4	36.8
4	1.4	36.6
8	2.8	36.9
8	2.8	36.7
11	3.9	36.9
12	4.2	36.8
12	4.6	36.8
12	4.6	36.8
16	5.6	36.8
16	5.6	36.8
20	7.1	36.9
24	8.46	36.9

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Airtightness and acoustic measurements have been performed in a controlled environment over a sample test wall. The sample wall has been gradually modified by making artificial leaks on the wall in the form of successive controlled openings (drills).

The airtightness measurements results are consistent to what is expected, resulting in higher Q50 and n50 values as the total leak area was increased (increased number of holes).

On the other hand, the acoustic results have turned out to be inconclusive, probably due to diverse factors which need to be analysed further in upcoming tests. Some of the future ideas to investigate are the following (but not limited to them):

- Can many very small-size individual leaks have a very different acoustic effect than one bigger leak with a similar equivalent leakage area?
- Can it be possible that although single number quantities do not present a significant variation, these variations would be observed in the spectral results?
- How does the shape of the leak affect acoustic performance of the wall?
- Could an acoustic camera have detected the very small leaks?
- Is there a limit in the leak size that can be properly detected using building acoustics frequency range?

The objective of the research is ambitious and requires much experimental and theoretical input in order to obtain a result which could be properly scaled and exported as an alternative “air leakage” location and quantification system.

6. AKNOWLEDGMENTS

This research is part of the Marie Skłodowska Curie Doctoral Network ActaReBuild project.[9]

7. REFERENCES

- [1] G. Raman, M. Prakash, R. C. Ramachandran, H. Patel, and K. Chelliah, “Remote Detection of Building Air Infiltration Using A Compact Microphone Array And Advanced Beamforming Methods.”
- [2] B. Kölsch, A. Tiddens, J. Estevam Schmiedt, B. Schirricke, and B. Hoffschmidt, “Detection of Air Leakage in Building Envelopes Using Ultrasound Technology,” in *Symposium on Whole Building Air Leakage: Testing and Building Performance Impacts*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2019, pp. 160–183. doi: 10.1520/STP161520180022.
- [3] B. Kölsch, I. Walker, W. Delp, B. Schirricke, and B. Hoffschmidt, “Comparison of Airflow and Acoustic Measurements for Evaluation of Building Air Leakage Paths in a Laboratory Test Apparatus,” 2022. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/6r69f93b>
- [4] V. Iordache and T. Catalina, “Acoustic approach for building air permeability estimation,” *Build Environ*, vol. 57, pp. 18–27, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.04.008.
- [5] V. Iordache and M. Zaharia, “Correlation Analysis of Air Transfer and Sound Wave Transfer,” *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 16, no. 1, pp. 84–90, 2019, [Online]. Available: <http://rjav.sra.ro/index.php/rjav/article/view/124>
- [6] T. Catalina, V. Iordache, and F. Iordache, “Correlation between air and sound propagation to determine air permeability of buildings for single/double wood pane windows,” *Energy Build*, vol. 224, p. 110253, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110253.
- [7] “ISO 10140-2:2010 - Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 2: Measurement of airborne sound insulation.” Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/42088.html>
- [8] ISO, “ISO 9972. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:2015).” 2015. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/55718.html>
- [9] “HORIZON – MSCA – 2021 – DN, No. 101072598 – Acoustic and Thermal Retrofit of Office Building Stock in EU.” Accessed: Sep. 26, 2023. [Online]. Available: <https://actarebuild.eu/>



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AED-2 Nuevos materiales y dispositivos acústicos.

PISTOLA DE IMPEDANCIA PARA LA DETECCIÓN DE LESIONES EN MATERIALES PÉTREOS

María Ángeles Navacerrada^{1*}, María Peña², Rafael Fort², María del Mar Barbero-Barrera³, Daniel de la Prida⁴ y Tomás Simón Gómez⁵

¹Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, Spain

²Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, Spain

³Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Calle Doctor Severo Ochoa 7, 28040 Madrid, Spain

⁴Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain

⁵Department of Physics and Astronomy, KU Leuven

RESUMEN

Los edificios y monumentos históricos con el paso de los años junto con la acción de factores naturales y humanos aceleran su degradación y con ello, su pérdida. Los análisis preventivos son clave para la identificación temprana y la conservación de los monumentos, evitando el avance de los daños y su eliminación antes de que el avance del estado de degradación se torne irreversible. El correcto diagnóstico de los problemas basado en la identificación de daños y sus procesos patológicos es fundamental para garantizar que las intervenciones a acometer sean las más adecuadas en cada caso. La pistola de impedancia permite la medición en sucesivos puntos de una superficie de magnitudes como el coeficiente de absorción sonora mientras se excita el campo sonoro con un pequeño altavoz generando una representación en colores de la superficie del material de manera similar a las imágenes que se obtienen con la técnica de termografía. En este trabajo se evalúa su potencial como técnica no destructiva en el ámbito del patrimonio arquitectónico para la detección de lesiones y alteraciones en la superficie de materiales pétreos. Aspectos como la rapidez y facilidad de uso la convierten en una técnica de gran potencial para su empleo en la identificación de lesiones sobre los materiales en el ámbito de la restauración.

ABSTRACT

Buildings and historical monuments degrade over time due to natural and human factors, which accelerates their deterioration and loss. Preventive analyses are key to early identification and conservation of monuments, avoiding the advancement of damages and their elimination before the state of degradation becomes irreversible. The correct

diagnosis of problems based on the identification of damages and their pathological processes is essential to ensure that the interventions to be carried out are the most appropriate in each case. The impedance gun allows the measurement of magnitudes such as the sound absorption coefficient at successive points on a surface while the sound field is excited with a small loudspeaker, generating a color representation of the material surface similar to the images obtained with thermography. This work evaluates its potential as a non-destructive technique in the field of architectural heritage for the detection of lesions and alterations on the surface of stone materials. Aspects such as speed and ease of use make it a technique with great potential for use in identifying injuries on materials in the field of restoration.

Palabras Clave— Patrimonio histórico, coeficiente de absorción, pistola de impedancia, materiales pétreos

1. INTRODUCCIÓN

Edificios y monumentos históricos ocupan los núcleos urbanos de nuestras ciudades y son un reflejo de nuestra historia digna de conservar. El paso de los años junto con la acción de factores naturales y humanos aceleran su degradación y con ello, su pérdida. Los análisis preventivos son clave para la identificación temprana y la conservación de los monumentos, evitando el avance de los daños y su eliminación antes de que el estado de degradación se torne irreversible.

El correcto diagnóstico de los problemas basado en la identificación de daños y sus procesos patológicos es fundamental para garantizar que las intervenciones a acometer sean las más adecuadas en cada caso, lo que implica

que no sólo se conozcan los daños en sí, sino también las condiciones climáticas y de evolución del propio edificio. En este sentido, la realización de cartografías de daños favorece la visualización y correlación entre los daños y su posición específica en el Bien pudiendo planificar y establecer los criterios de intervención. Una de las técnicas más empleadas para ello es el análisis digital de imágenes, el levantamiento fotogramétrico o el uso de técnicas LiDAR [1-2]. Junto con ellas, el uso de técnicas no destructivas (TND) se ha ido implantando sucesivamente en los últimos años debido a una mejora significativa de la tecnología necesaria para realizar las evaluaciones in situ [3-4]. Estas técnicas permiten representar la distribución, en la superficie de los edificios o de piezas de interés cultural, de parámetros físicos o químicos que detectan las zonas más deterioradas. Entre las técnicas disponibles, las técnicas de tomografía de resistividad eléctrica, ultrasonidos o georadar, entre otras, dan información sobre la estructura interna de los materiales pudiendo detectar huecos, fisuras, discontinuidades, humedades, irregularidades... otras técnicas como la espectrofotometría, dureza, medidor de humedad aportan información de la superficie de los materiales. En este sentido, es fundamental identificar los procesos patológicos y seleccionar en cada caso las técnicas más adecuadas que permitan alcanzar un mayor nivel de información y que permitan identificar, con mayor grado de precisión, las causas y grado del deterioro. Estas técnicas de contacto implican la realización de cuadrículas o mallas analíticas, que pueden ser muy laboriosas cuando cubren grandes superficies. Frente a esto, se prima el empleo de técnicas que minimicen el proceso de análisis aunque implique una cierta pérdida de precisión.

La pistola de impedancia acústica permite la medición en sucesivos puntos de una superficie de magnitudes como el coeficiente de absorción sonora mientras se excita el campo sonoro con un pequeño altavoz generando una representación en colores de la superficie del material de manera similar a las imágenes que se obtienen con la técnica de termografía. Se ha utilizado para evaluar problemas acústicos en automoción en maquinaria industrial o en aeronáutica con distintos objetivos como visualizar el campo sonoro generado por un dispositivo, evaluar caminos de transmisión del sonido o para la medición del coeficiente de absorción sonora de un material. Aspectos como la rapidez y facilidad de uso la convierten en una técnica de gran potencial para su empleo como técnica no destructiva en la identificación de lesiones sobre los materiales en el ámbito de la restauración. En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre el uso de la pistola de impedancia como técnica no destructiva en el ámbito del patrimonio arquitectónico para la detección de lesiones y alteraciones en la superficie de materiales pétreos. Se muestran resultados de mediciones llevadas a cabo en piedra natural en el laboratorio e in situ y se compara con los resultados obtenidos con otras técnicas no destructivas utilizadas habitualmente en conservación del patrimonio.

2. TÉCNICAS Y MATERIALES

Se ha utilizado la pistola de impedancia de Microflown Technologies [5-6]. Este dispositivo portátil consta de un altavoz esférico de 15 cm de diámetro, un sensor PU (velocidad de partículas y presión sonora) montados a una distancia de 27 cm sobre una estructura robusta que permite su fácil manipulación. El dispositivo portátil, tal como se muestra en la Figura 1, se conecta a través del acondicionador de señal Microflown MFSC-2 a un ordenador que se encarga de recolectar las señales medidas y realizar los cálculos mediante el software Velo. El rango de frecuencia de medición se puede establecer entre 300 Hz y 10.000 Hz.



Figura 1. Montaje de medida de la pistola de impedancia

El software Velo permite operar en el modo Scan and Paint basado en la adquisición de la presión y velocidad de las partículas de manera continua [5]. La medida se realiza desplazando el sensor manualmente sobre la superficie del material mientras se graba con una cámara. La grabación se divide en múltiples segmentos aplicando un algoritmo de cuadrícula espacial y cada fragmento de la señal se vincula con cada una de las celdas de la cuadrícula. Usando esta malla discreta de valores y aplicando una interpolación lineal se obtiene una representación en color del, por ejemplo, el coeficiente de absorción sobre la superficie del material. Un esquema del proceso descrito se muestra en la Figura 2.

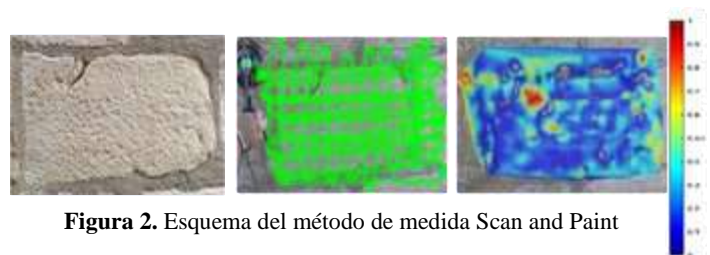


Figura 2. Esquema del método de medida Scan and Paint


Se ha escogido la piedra natural por ser uno de los materiales de mayor importancia en la construcción de edificios históricos. Sin embargo, su exposición a la intemperie da lugar a procesos de deterioro que abarcan desde las fracturas provocadas por los gradientes térmicos hasta la heladicidad o la cristalización de sales u otros componentes contaminantes. A pesar de que el proceso de deterioro es muy lento, algunos de estos procesos generan sobre los elementos pétreos daños irreversibles y de gran magnitud. Se han llevado a cabo mediciones sobre la superficie de materiales pétreos en

laboratorio e in situ. Se resumen en las siguientes secciones los resultados obtenidos hasta ahora en este tipo de materiales.

3. MEDICIONES EN PIEDRA NATURAL EN LABORATORIO E IN SITU

3.1. En laboratorio

En el laboratorio se han llevado a cabo mediciones en placas de piedra caliza nueva con superficies lisas y de distinta densidad y porosidad: la piedra de Colmenar, piedra de Hontoria y piedra de Marés. En la Figura 3 se muestran fotos de la superficie de las placas de piedra y los valores de la densidad y la porosidad abierta de estas piedras.



Material	Densidad aparente (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)	Dimensiones
Piedra de Colmenar	2504 ± 24	7,45 ± 0,87	40 cm x 40 cm
Piedra de Hontoria	2102 ± 18	17,73 ± 1,45	25 cm x 25 cm
Piedra de Marés	1940 ± 13	28,37 ± 0,47	

Figura 3. Foto de la superficie de las placas, de izquierda a derecha, de piedra de Colmenar, de Hontoria y de Marés. Se indican los valores de la densidad, de la porosidad abierta y de las dimensiones de las placas de piedra natural.

Los resultados indicaron que conviene no trabajar con tamaños de placa menor de 25 cm y rodear la placa con material absorbente como una lana mineral [7]. El tamaño finito de la muestra se traduce en la presencia de oscilaciones en la curva de absorción que condicionan las frecuencias útiles en el modo Scan and Paint. Las imágenes se obtienen en tercio de octava y se establece el rango óptimo de frecuencias para el análisis entre 2500 y 5000 Hz.

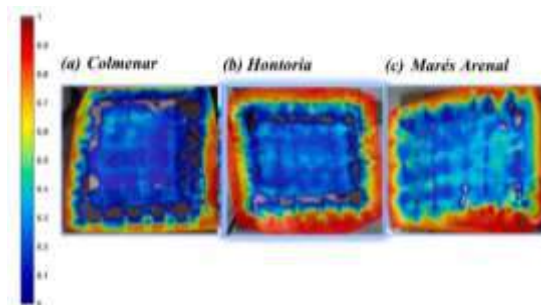


Figura 4. Imágenes de Scan and Paint de la superficie de las tres placas de piedra natural para la banda de frecuencia de 4000 Hz.

Las imágenes de la Figura 4 corresponden a la superficie de placas lisas sin lesiones en la banda de 4000 Hz. En las imágenes predominan las áreas de coeficiente de absorción entre 0,1 y 0,3. Estas áreas se alternan con otras de coeficiente de absorción de hasta 0,5 principalmente sobre la superficie de la piedra de Marés (de menor densidad y mayor porosidad), que estarían indicando, en principio, variaciones locales de la porosidad de la superficie de la piedra. Estas imágenes nos sirven como referencia para comparar con las imágenes que se obtendrán en piedras con lesiones

3.2. In situ

La iglesia de San Juan Bautista se encuentra localizada en el término municipal de Guadalix de la Sierra. Se trata de una iglesia realizada en varias etapas del siglo XVI siendo la primera de ellas la construcción de la torre. El conjunto de la torre está ejecutado con sillares de dolomías procedentes de canteras de la zona. En el año 1992 la iglesia fue sometida a un proceso de restauración. Las mediciones se llevaron a cabo en la pared exterior del tramo central de la torre (ver Figura 5), dado que presentaba sillares con lesiones muy variadas, generadas principalmente por la presencia de sales y humedades procedentes de los morteros de cementos utilizados en la intervención comentada [7]. La cristalización de las sales en los poros de los materiales pétreos es uno de los principales mecanismos causantes de su deterioro. Los sillares tienen unas dimensiones aproximadas de 50-60 cm de ancho 30 cm de alto y 50 cm de espesor.



Figura 5. Pared este del tramo central de la torre en la que se han llevado a cabo las mediciones in situ.

Como se aprecia en la Figura 5, los sillares del paramento muestran distintos procesos de deterioro que alteran y modifican la morfología de su superficie. En una inspección visual se detectan eflorescencias salinas y subeflorescencias que han dado lugar a la formación de desplazados, descamados y arenización. Los morteros de cemento de junta, con elevada dureza y rigidez, también generan importantes fisuras de retracción en el contacto con los sillares pétreos. En estos contactos mortero sillar también se concentran eflorescencias y subeflorescencias que provocan desplazados y caída de volúmenes perimetrales en los sillares.

En la Figura 6 se muestran a modo de ejemplo las imágenes de Scan and Paint para tres sillares y para cuatro bandas de tercio de octava. Los sillares muestran lesiones a diferentes

escalas: (a) un sillar con alveolos (huecos) en distintos grados de génesis, (b) un sillar con una fisura de unos 7 cm de longitud en la parte central superior y (c) un sillar con un descamado de poca profundidad y con fisuras y desplazados en los bordes del sillar.

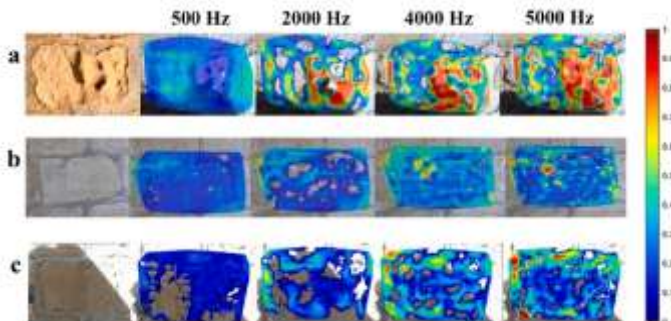


Figura 6. Foto e imágenes de Scan and Paint para cuatro bandas de tercio de octava para (a) sillar con alveolos de distintas dimensiones, (b) sillar con una grieta de unos 7 cm de longitud y (c) sillar con un descamado de poca profundidad y desplazados y pérdidas de volúmenes en la unión con el mortero.

La presencia de eflorescencias, oquedades, desplazados, suciedad o sales se traducen en cambios del coeficiente de absorción sonora. Las lesiones que dan lugar a la formación de cavidades, desniveles, bordes o aristas, en la superficie del sillar se muestran en las imágenes de Scan and Paint como áreas de máxima absorción a la frecuencia para la que la longitud de onda es comparable a las dimensiones de estos bordes o desniveles. Del dato de la frecuencia a partir de la que la lesión es visible es posible obtener información cuantitativa sobre sus dimensiones. La longitud del alveolo situado en el centro del sillar (a), de entre 12-14 cm, explica las zonas de máxima absorción visibles ya a partir de 2000 Hz, no por un aumento en la porosidad de la superficie del material pétreo, sino por un efecto de difracción o dispersión de las ondas incidentes en superficies que no son planas. Para frecuencias más altas, 4000 y 5000 Hz, la longitud de onda es comparable a la longitud del resto de alveolos presentes en el sillar y el área de la zona de máxima absorción se amplía a toda el área derecha del sillar. La zona central, menos deteriorada, presenta una tonalidad azul correspondiente a un coeficiente de absorción menor, con zonas de mayor coeficiente de absorción por el aumento de la porosidad o presencia de sales. La grieta de unos 7 cm del sillar (b) se empieza a distinguir del resto del sillar a 4000 Hz y en la imagen a 5000 Hz la grieta se visualiza de una manera clara como una zona de absorción máxima. La zona central del sillar, mejor conservada, se caracteriza por presentar el menor coeficiente de absorción (tono azul), con valores comparables a los presentados por la superficie de las placas nuevas medidas en el laboratorio. Valores más altos del coeficiente de absorción se miden en la zona de alrededor de la grieta y los bordes del sillar, apuntando a un aumento de la porosidad de la piedra o a la presencia de eflorescencias salinas. El descamado del sillar (c) no es

claramente visible para ninguna frecuencia, el desnivel que se genera en el sillar no es suficiente para visualizarlo por difracción o dispersión. Si se aprecia la pérdida de volumen de la parte superior izquierda del sillar, en la unión con el mortero, desde los 2000 Hz. Los bordes y las aristas entre el sillar y el mortero, de menor longitud, se distinguen a frecuencias más altas y de menor longitud de onda.

Los ensayos descritos evidencian el potencial de la pistola de impedancia como técnica de análisis no destructivo para materiales pétreos. Es una técnica que no interfiere con el funcionamiento del edificio pero la medida se tiene que hacer próxima a su superficie. Las zonas de máxima absorción se relacionan principalmente con lesiones que suponen una pérdida de material y la presencia de bordes y aristas. Estas zonas de máxima absorción se combinan en las imágenes con áreas en las que el coeficiente de absorción varía entre 0,2 y 0,6. Un valor próximo a 0,6 indicaría lesiones que alteran la superficie del sillar haciéndola más porosa. Valores de 0,2, áreas donde la piedra del sillar se presenta lisa o bien conservada. La evolución de las imágenes de Scan and Paint en función de la frecuencia permite un análisis cuantitativo de la escala de las lesiones. No obstante, una técnica sola no es capaz de arrojar resultados concluyentes. Para confirmar y validar los resultados obtenidos y para una interpretación más completa de los resultados es interesante combinar esta información con la obtenida con otras técnicas no destructivas utilizadas habitualmente en conservación del patrimonio histórico.

4. COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS NO DESTRUCTIVO

4.1. In situ

Se llevó a cabo una prospección de los sillares de la iglesia de San Juan Bautista con las siguientes técnicas no destructivas: la pistola de impedancia, termografía infrarroja, conductividad eléctrica y ultrasonidos [8]. Se muestran los resultados para tres sillares en la Figura 7. Con las dos últimas técnicas se utilizó una malla de muestreo de 5 cm x 5 cm sobre cada uno de los sillares y posteriormente se realizó una modelización superficial con el software Surfer. Para la pistola de impedancia se escoge la imagen de 5000 Hz. Las técnicas como termografía, pistola de impedancia y conductividad eléctrica proporcionan información sobre el deterioro superficial, los ultrasonidos proporcionan además datos fiables de la estructura interna del material.

De acuerdo con las imágenes de la Figura 7, la termografía detecta la presencia de sales en el mortero. Análisis mediante cromatografía iónica en muestras tomadas en el sitio confirmaron elevada presencia de sales en sillares y mortero, principalmente nitratos y sulfatos. La presencia de sales en el mortero se identifica en la imagen de termografía como áreas

de mayor temperatura. Por el contrario, una reducción de la temperatura superficial puede observarse en las áreas con alveolos debido a que éstos se comportan como aislantes térmicos. La termografía confirma que las zonas de más alto coeficiente de absorción del sillar 3 combinan el efecto del descamado y la presencia de sales, sin embargo la grieta del sillar 2 y el desplazado del sillar 1, lesiones detectadas por la pistola de impedancia, no tienen un efecto notable sobre la termografía.

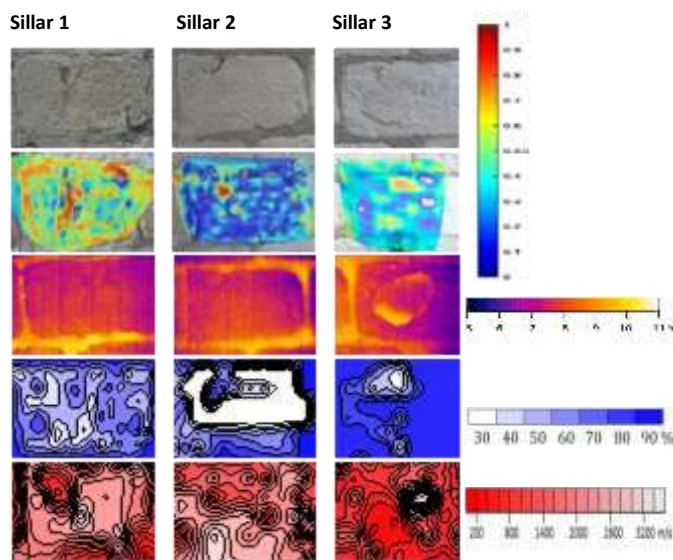


Figura 7. Imágenes para tres sillares con cuatro técnicas de evaluación no destructiva, de arriba abajo: 1. Pistola de impedancia, 2. Termografía infrarroja, 3. Conductividad eléctrica y 4. Ultrasonidos

La medida de la conductividad eléctrica permite evaluar la humedad superficial de los sillares. Los valores de humedad que se miden son altos, lo que confirmaría la presencia de sales higroscópicas que aumentan la retención de agua. Hay una buena correspondencia entre las imágenes de conductividad y las de la pistola de impedancia. Las variaciones en la humedad superficial se corresponden con las variaciones del coeficiente de absorción en el descamado del sillar 3, la zona no deteriorada del sillar 2 y en la imagen heterogénea que para ambas magnitudes presenta el sillar 1. La formación de eflorescencias salinas pulverulentas o en costra dura se ve favorecida por la evaporación de las humedades de los sillares. Los valores más bajos de humedad, en el sillar 2 y el sillar 3, se corresponden con zonas de coeficiente de absorción bajo indicando zonas mejor conservadas o superficies en las que las sales están llenando la estructura porosa. La baja humedad y el alto coeficiente de absorción que se mide alrededor del descamado del sillar 3 indicaría sales dispuestas de manera pulverulenta y porosa.

Las imágenes de ultrasonidos muestran las velocidades más bajas donde el sillar está más deteriorado, como en los bordes

y el desplazado del sillar 1, la grieta y el lateral derecho del sillar 2 y la zona central correspondiente al descamado del sillar 3, zonas que presentan alto coeficiente de absorción. Los valores más altos de la velocidad de ultrasonidos se miden donde el sillar está mejor conservado, como las zonas centrales a ambos lados del desplazado del sillar 1 y la parte inferior de la grieta del sillar 2 que además se corresponden con las zonas de menor coeficiente de absorción.

Los resultados que ofrece la pistola de impedancia son confirmados y completados por las otras técnicas [8]. La pistola de impedancia puede permitir una cartografía inicial del edificio con la medición de varios sillares en un tiempo corto. La técnica se podría usar para una inspección inicial y establecer a partir de ahí que partes requieren un análisis más específico con más técnicas.

4.2. En laboratorio

Teniendo en cuenta que las sales son una de las causas de deterioro más importante se diseña un experimento para monitorizar el deterioro acelerado por cristalización de sales en el laboratorio según la norma UNE EN 12370 para la piedra de Colmenar y la piedra de Marés [9]. Cada 7 ciclos, consistentes cada uno en la inmersión durante 2 horas en la solución salina y secado a unos 70 grados durante al menos 20 horas, se realiza un estudio de control de la evolución de la degradación de las placas mediante técnicas no destructivas. Las muestras fueron sometidas a un total de 35 ciclos. La reacción al proceso de envejecimiento con sales fue diferente debido a la diferencia de textura y composición de cada una de las piedras, generándose procesos patológicos concretos para cada una de ellas. La piedra de Colmenar presenta un bajo porcentaje de porosidad, en torno al 8 %, con un tamaño de poro predominante entre 0,01 y 5 micras. La piedra de Marés presenta un porcentaje de porosidad más alto, un 28 %, con un tamaño de poro predominante entre 10 y 120 micras. De manera que la piedra de Marés presenta mayor accesibilidad al agua y a las sales. La pistola de impedancia muestra resultados variables como se muestra en la Figura 8 con las imágenes correspondientes a 0, 14 y 35 ciclos que la revela de nuevo como técnica útil para la identificación prematura de lesiones superficiales.

La piedra de Colmenar se mantiene con una masa prácticamente constante durante los ciclos, sufriendo una ligera disminución del 0,4 % debido a desprendimientos en los bordes de la placa y algunas otras partes de la superficie. La imagen inicial de la pistola de impedancia es una imagen con áreas de coeficiente de absorción entre 0,2 y 0,4 con predominio de las áreas de menor coeficiente de absorción. Las zonas de coeficiente 0,4 se amplían con los ciclos indicando zonas de la superficie en la que se depositan sales. Cuando la porosidad es baja la sal cristaliza principalmente sobre la superficie como se ven en la imagen real de la piedra

y puede dar lugar a mayor absorción o dispersión que en cualquiera de los dos casos se traduce en un aumento del coeficiente de absorción.

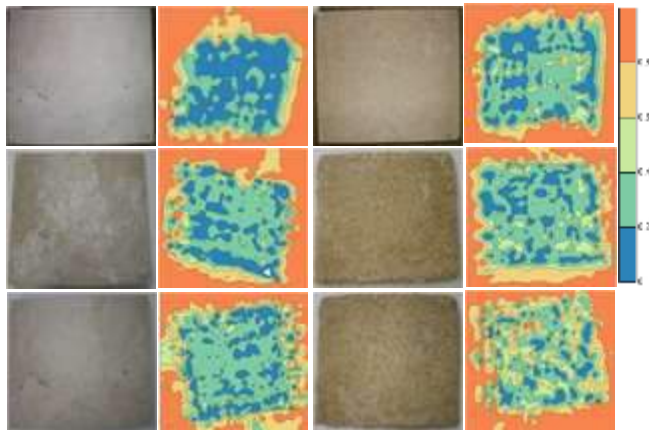


Figura 8. Imágenes a 5000 Hz de la pistola de impedancia para 0, 14 y 35 ciclos para la piedra de Colmenar y de Marés.

La piedra de Marés experimenta una disminución del volumen en torno al 20 % debido a la pérdida gradual de masa desde los ciclos iniciales por la disgregación de los bordes y vértices principalmente pero también de la zona central de su superficie. En la imagen a los 14 ciclos las zonas en las que se mide el coeficiente de absorción más elevado estarían empezando a indicar la presencia de bordes y de la superficie de pérdida de material. La pistola de impedancia reproduce como si de una fotografía de la superficie se tratase, con valores crecientes del coeficiente de absorción, las zonas en las que la superficie se mantiene, las zonas en las que la superficie ha modificado su porosidad y las zonas de mayor coeficiente de absorción que indicarían la pérdida de material [9].

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo se ha evaluado la viabilidad del uso de la pistola de impedancia como técnica no destructiva en materiales pétreos para conservación del patrimonio histórico. El uso de esta técnica arroja novedades interesantes para su empleo como una técnica más de estudio complementaria a las utilizadas en la actualidad. Presenta la ventaja, respecto a otras técnicas que se trata de una técnica de manejo sencillo, el tiempo de medición es corto y permite medir sobre áreas grandes. Las capas de suciedad o presencia de sales se traducen en variaciones del coeficiente de absorción respecto al valor de la piedra sin lesiones. Las lesiones que dan lugar a la formación de cavidades, desniveles, bordes o aristas, se muestran en las imágenes como áreas de máxima absorción a la frecuencia para la que la longitud de onda es comparable a las dimensiones de los bordes o desniveles que presenta la lesión. En el caso de tener que elegir la imagen que represente el estado de la superficie,

las frecuencias más adecuadas en piedra serían 4000 y 5000 Hz. En placas de piedra en el laboratorio, el rango útil de frecuencias es dependiente del tamaño. Es conveniente no trabajar con placas de dimensiones menores de 25 cm x 25 cm. Los resultados que se han derivado hasta ahora son muy interesantes y prometedores de manera que se plantea continuar con las siguientes líneas:

- ❖ explorar las posibilidades de la pistola de impedancia en el modo de operación de pérdidas por transmisión para la detección de lesiones internas en muros de edificios
- ❖ monitorizar lesiones en materiales pétreos por otros agentes, como por ejemplo en un ensayo de envejecimiento por heladicidad
- ❖ ampliar las evaluaciones in situ y en laboratorio a otros tipos de materiales: granitos o areniscas, también en hormigones o para detectar zonas de despegue en morteros de revestimiento

6. REFERENCIAS

- [1] A. Owda, J. Balsa-Barrerero and D. Fritsch, Methodology for digital preservation of the cultural and patrimonial heritage: generation of a 3D model of the Church St. Peter and Paul (Calw, Germany) by using laser scanning and digital photogrammetry, *Sensor Review*. 38, pp. 282–288, 2018.
- [2] J. Corso, J. Roca and F. Buill, Geometric analysis on stone façades with terrestrial laser scanner technology, *Geosciences (Basel)* 7 (103), pp. 1-12, 2017.
- [3] C. Moses, D. Robinson and J. Barlow, Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review, *Earth-Science Reviews* 135, pp. 141–161, 2014.
- [4] M. E. Hatir, M. Korkaç and M. Başar, Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, pp. 3465–3478, 2019.
- [5] E. Tjjs, H. E. de Bree, S. Steltenpool and J. Smyrnova, Scan and Paint: a novel sound visualization technique, *Proceedings of Internoise 2010, Lisbon*, 2010.
- [6] A. Pedrero, M. A. Navacerrada, D. de la Prida, L. Iglesias y A. Díaz-Chyla, On the accuracy of the sound absorption measurement with an impedance gun, *Applied Acoustics* 158, 107039, 2020.
- [7] M. A. Navacerrada, M. M. Barbero-Barrera, R. Fort, D. de la Prida, J. C. Núñez and T. S. Gómez, Application of acoustic impedance gun to non-destructively monitor stone damage, *Construction and Building Materials* 323, 126510, 2022.
- [8] R. Fort, J. Feijoo, M. J. Varas-Muriel, M. A. Navacerrada, M. M. Barbero-Barrera and D. de la Prida, Appraisal of non-destructive in situ techniques to determine moisture- and salt crystallization-induced damage in dolostones, *Journal of Building Engineering* 53, 104525, 2022.
- [9] M. Sánchez, M. A. Navacerrada, R. Fort and M. M. Barbero-Barrera, Assessment of limestone cladding deterioration due to crystallization of salts by non-destructive techniques, *Construction and Building Materials* 400, 132640 (2023).

ESTUDIO DE PROTOTIPOS ACÚSTICOS BASADOS EN RESIDUOS DE TAPONES DE PLÁSTICO

Romina del Rey Tormos^{*1}
Jose Enrique Crespo Amorós²
Joan Escales Tur¹
Jesús Alba Fernández¹

¹Universitat Politècnica de València. Escola Politècnica Superior de Gandía, Grao de Gandía, España
²Universitat Politècnica de València. Escola Politècnica Superior d'Alcoi, Alcoi-, España

RESUMEN

En este trabajo se presentan los primeros prototipos de soluciones diseñadas a partir de tapones de plástico, que buscan aplicaciones acústicas. Los tapones de plástico son un residuo que proviene del sector de los envases ligeros, por lo tanto, debe de depositarse en el contenedor amarillo. El 99% de los tapones de plástico es polietileno, por lo que su reciclado no es complicado, el problema del reciclado de los tapones de plástico proviene de la separación o criba. La mayoría de los tapones no son solidarios con el envase, por lo que se pierden durante el ciclo del reciclado o acaban en vertedero.

Buscar una aplicación a estos residuos, que pueda aportar mejoras acústicas (posible aislamiento acústico, y/o acondicionamiento acústico), es pues, una alternativa sostenible. En este trabajo se muestran resultados de mediciones de aislamiento acústico a ruido aéreo obtenidas en cámara de transmisión a escala, y de absorción acústica, obtenidas en cámara reverberante a escala de configuraciones simples de soluciones diseñadas con tapones de plástico, recogidas en la propia cafetería del Campus d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València.

ABSTRACT

This paper presents the first prototypes of solutions designed using plastic bottle caps for acoustic applications. Plastic bottle caps are a waste product from the lightweight packaging sector and should be disposed of in the yellow container. 99% of plastic bottle caps are made of polyethylene, making their recycling relatively straightforward. However, the challenge with recycling

plastic bottle caps lies in the separation and screening process. Since most caps are not attached to the containers, they are often lost during the recycling cycle or end up in landfills. Finding an application for these waste materials that can contribute to acoustic improvements (such as possible sound insulation and/or acoustic conditioning) presents a sustainable alternative. This study displays measurement results of airborne sound insulation obtained in a scaled transmission chamber and acoustic absorption obtained in a scaled reverberation chamber. These measurements were performed on simple configurations of solutions designed with plastic bottle caps collected from the cafeteria on the Campus d'Alcoi of the Universitat Politècnica de València.

Palabras Clave— *acústica edificación, plástico, reciclaje, aislamiento acústico, economía circular*

1. INTRODUCCIÓN

El plástico es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo debido a su versatilidad, durabilidad y bajo coste. Sin embargo, su uso desmedido ha llevado a una crisis ambiental de proporciones preocupantes. Los plásticos son altamente persistentes en el medio ambiente y tardan cientos de años en descomponerse. La nueva conciencia y normativa Europea [1] necesita de acciones de economía circular con una gestión innovadora de los recursos, reajustando los modelos de fabricación y reutilización de productos. Los flujos de productos actuales deben de servir de fuentes futuras de recursos secundarias [2].

La reutilización de plásticos es una estrategia fundamental para reducir la contaminación y promover la sostenibilidad. Los plásticos desechables de un solo uso deben desaparecer

* *Autor de contacto:* roderey@fis.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

de nuestra vida cotidiana y darles una segunda vida útil. La reutilización de plásticos tiene múltiples beneficios ambientales; reduce la cantidad de plásticos que terminan en vertederos, reduciendo así la contaminación del suelo y el agua. Se evita la liberación de sustancias químicas tóxicas que pueden derivarse durante la descomposición o quema de éstos y se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción y eliminación de plásticos.

Los tapones de plástico son un residuo que proviene del sector de los envases ligeros y deben depositarse en el contenedor amarillo. Estos envases ligeros, son aquellos que tienen como característica común una baja relación peso/volumen. En este contenedor fundamentalmente deben depositarse botellas y botes de plástico, film, latas y briks u otros envases mixtos. Según Ecoembes [3], se entregaron más de 1 millón y medio de toneladas de envases domésticos para reciclar, de los cuales 708.596 toneladas fueron envases de plástico.

Los materiales en los cuales está fabricado el 99% de tapones de plástico son el polietileno de alta y baja densidad y son reciclables 100%. El problema de su reciclado deriva en que estos tapones, en la actualidad, no son solidarios con su envase, y en el momento de la separación o criba se desechan junto con otros materiales al vertedero o se pierden en el camino de transporte. La nueva ley de envases y embalajes, Real Decreto 1055/2022 de Envases y Residuos de Envases desde el 29 de diciembre de 2022 [4], avanza hacia la economía circular e indica que todos los envases deben ser reciclables en el año 2030 y si es posible reutilizables. En esta normativa se propone el reto de reciclabilidad del 65% de los envases para el año 2023 y 70% para el año 2030. Existen fundaciones, como la Fundación Seur, que han llevado a cabo campañas solidarias como “Tapones para una nueva vida”, una recogida selectiva de tapones. Con este tipo de iniciativas se han conseguido reciclar 7665 toneladas de tapones de plástico, evitando la emisión de 9600 toneladas de CO₂ a la atmósfera, principal causante del cambio climático [5].

En este trabajo se presentan los primeros prototipos de soluciones diseñadas a partir de tapones de plástico, que buscan aplicaciones acústicas, bien en el aislamiento acústico como en el acondicionamiento acústico. Los diseños de soluciones acústicas han sido elaborados con tapones de plástico recogidos del sector de la hostelería, concretamente de la propia cafetería de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA).

2. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA. DISEÑO DE PROTOTIPOS

2.1. Paneles diseñados para la evaluación de aislamiento acústico a ruido aéreo.

Se diseñan paneles elaborados con tapones de plástico pensados como posibles soluciones sostenibles al aislamiento acústico a ruido aéreo. Se realizan ensayos de aislamiento acústico, en el Campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València, en una cámara de transmisión para muestras de tamaño reducido. Los ensayos de aislamiento nos permiten obtener el valor del índice de reducción sonora, R (dB) a partir de los 400 Hz. Los ensayos se realizan según la norma UNE-EN ISO 10140-2:2022 [6]. La cámara de transmisión de tamaño reducido, o cámara de transmisión para muestras de pequeño tamaño es una herramienta fundamental en el campo de la caracterización de materiales todavía en fase de investigación y desarrollo. Detalles de la fabricación y puesta en marcha de la misma se pueden encontrar en algunas referencias [7] y en otras ediciones de Tecniacústica ya se han mostrado resultados del aislamiento de particiones ligeras obtenidos en esta cámara de transmisión [8].

Los paneles se han diseñado en forma de matriz rectangular de 15x9 tapones, con un marco de madera perimetral (0.9mx0.6m). Se han definido 5 configuraciones distintas: 2 simples, 2 dobles y una configuración tipo sándwich con una capa de corcho. La capa de corcho es de 5 mm de espesor, y una densidad de 200 kg/m³. El sentido de los tapones puede ser Hueco (H) o Plano (P). En la Figura 1 se muestra un ejemplo de algunas una de las combinaciones posibles.



Figura 1. Detalle de algunas configuraciones a ensayar: (a) Configuración simple Hueca (b) Configuración simple Plana, (c) Configuración doble Plana-Plana.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de panel diseñado con tapones de plástico para el ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo y en la Figura 3 una imagen del ensayo de transmisión en la cámara de transmisión a escala.

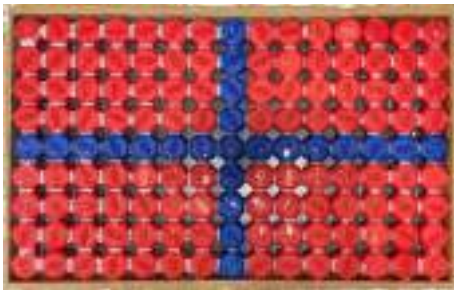


Figura 1. Matriz de 15x9 tapones a ensayar en cámara de transmisión a escala



Figura 3. Detalle de ensayo en cámara de transmisión a escala.

2.2. Paneles diseñados para la evaluación de absorción sonora.

Se diseñan 3 paneles elaborados con tapones de plástico pensados como posibles soluciones sostenibles al acondicionamiento acústico. Se realizan ensayos de absorción sonora, en el Campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València, en una cámara reverberante para muestras de tamaño reducido. Estos ensayos nos permiten conocer la absorción sonora de nuevas configuraciones a partir de los 400 Hz. Los ensayos se realizan según la norma UNE-EN ISO 354:2004 [9]. La cámara reverberante a escala, al igual que la cámara de transmisión de tamaño reducido, es una herramienta fundamental en el campo de la caracterización de materiales todavía en fase de investigación y desarrollo. Detalles de la fabricación, puesta en marcha y calibración de esta cámara se pueden encontrar en [10].

Para determinar la absorción sonora, se han elaborado paneles en forma de matriz rectangular con 10x8 tapones y marco de madera perimetral (0.5mx0.6m).

Se han diseñado 3 configuraciones distintas: 2 simples (P, H) y 1 configuración con una capa fieltro de cáñamo de 5mm de espesor y una densidad de 242 kg/m³, para realizar ensayos

según [9] en la cámara reverberante a escala del Campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de panel diseñado con tapones de plástico para el ensayo de absorción sonora en cámara reverberante a escala y 2 combinaciones del mismo con una capa de fieltro de cáñamo. En la figura 5 se muestra la cámara reverberante a escala.



Figura 4. Detalle de algunas configuraciones a estudiar para absorción: (a) Matriz de 10x8 tapones: configuración Plana (P), (b) Matriz con fieltro de cáñamo en parte superior: 0configuración Plana Cáñamo Superior (P-C-S), (c) Matriz con fieltro de cáñamo en parte inferior: configuración Plana Cáñamo Inferior (P-C-I).



Figura 5. Detalle de ensayo en cámara reverberante a escala.

3. RESULTADOS

3.1. Aislamiento acústico a Ruido Aéreo.

Se han diseñado 5 configuraciones distintas: 2 simples (P, H), 2 dobles (PP, HH) y un tipo sándwich (PMP) con corcho para realizar ensayos según [6] en la cámara de transmisión a escala del Campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València. En la figura 6 se muestran los resultados de aislamiento acústico a ruido aéreo que se obtienen de 4 de las configuraciones diseñadas: las simples (P y H) y las dobles (PP, HH). En la figura 7 se muestran los resultados comparativos de las configuraciones PP y PMP (Plana-Corcho-Plana).

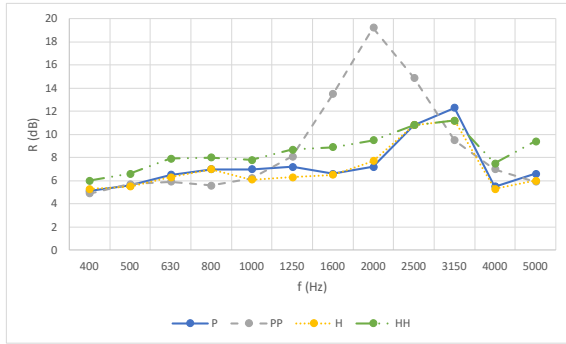


Figura 2. Aislamiento acústico a ruido aéreo entre 400 y 5000Hz para las configuraciones P, H, PP y HH.

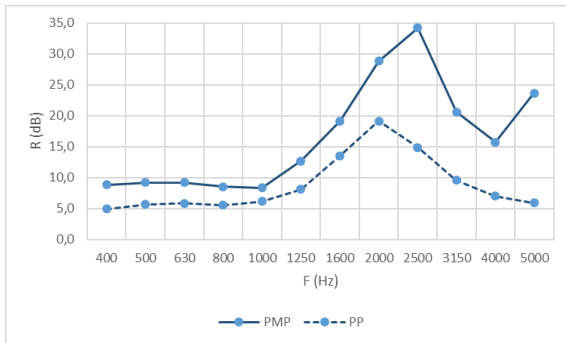


Figura 3. Aislamiento acústico a ruido aéreo entre 400 y 5000Hz para las configuraciones PP y el sándwich Plana-Corcho-Plana (PMP).

Se decide realizar una estimación del índice de reducción ponderado R_w [11]. Este valor, para el caso de las configuraciones estudiadas no refleja exactamente el significado del valor global que especifica la norma [11]. En la norma se consideran frecuencias por debajo de 400 Hz para el cálculo de este valor global. No es el caso de las configuraciones estudiadas en este trabajo, ya que no se pueden considerar los valores por debajo de 400Hz como valores representativos del aislamiento acústico. El valor global representado en la figura 8, y que designamos como R_w^* , nos puede servir como valor comparativo entre las 5 configuraciones estudiadas.

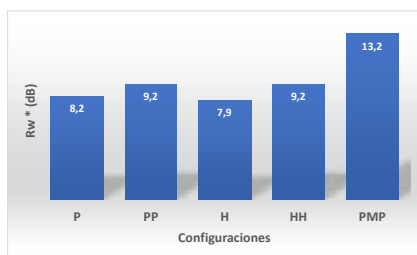


Figura 8. Valores globales (R_w^*) de índice de reducción acústica de las diferentes configuraciones.

3.2. Absorción Sonora.

Se han diseñado 3 configuraciones distintas: 2 simples (P, H) y 1 configuración con una capa de fieltro de cáñamo para realizar ensayos según [9] en la cámara reverberante a escala del Campus de Gandia de la Universitat Politècnica de València. En la figura 9 se muestran los resultados de la absorción sonora de las 2 configuraciones simples diseñadas (P y H). En la figura 10 se muestran los resultados comparativos de las configuraciones Plana + Cáñamo superior y Plana + Cáñamo inferior.

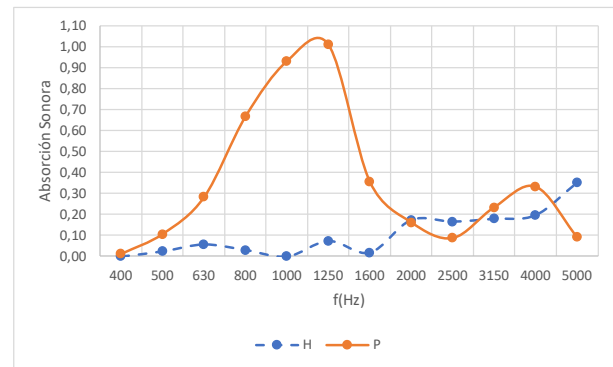


Figura 9. Absorción sonora por bandas de tercio de octava de las configuraciones simples H y P.

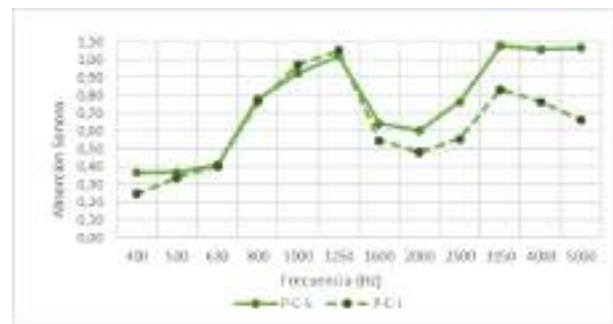


Figura 10. Absorción sonora por bandas de tercio de octava de las configuraciones Plana + Cáñamo superior (P-C-S) e inferior (P-C-I).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan unos prototipos diseñados con tapones de plástico como eco-soluciones al aislamiento y al acondicionamiento acústico.

Se han realizado ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo en cámara de transmisión a escala de diferentes configuraciones; los resultados nos permiten diferenciar la configuración con mayor potencial de ser utilizada como elemento ligero para el aislamiento acústico. La

configuración Plana-Plana presenta el máximo de aislamiento más pronunciado y en un margen de tercios más amplio que el resto de configuraciones, esto es, desde los 1250 Hz hasta los 3150 Hz aproximadamente. Se ha añadido a esta configuración una lámina de corcho con el fin de diseñar una estructura sándwich; los resultados muestran un aumento considerado de los valores de aislamiento al añadir este material.

Se han realizado ensayos de absorción sonora en cámara reverberante a Escala de diferentes configuraciones; los resultados muestran una gran diferencia entre los valores de absorción de la configuración hueca (H) y plana (P). La configuración hueca (H) presenta valores de la absorción en todo el espectro de frecuencias estudiado por debajo de 0.3. En cambio, la configuración plana (P) presenta máximos de absorción muy pronunciados, y en frecuencias medias (630-1600Hz). Se ha añadido a esta configuración una lámina de material ecológico (cáñamo) y los resultados muestran una mejora en los valores de la absorción en un amplio margen frecuencial.

Estos resultados muestran que es posible utilizar los tapones de plástico como parte de soluciones acústicas eco-sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Como trabajo futuro, es necesario la búsqueda de otros materiales para el diseño de las combinaciones sándwich, como puedan ser de base vegetal (yute, lino) o provenientes de reciclado (residuos textiles) para encontrar así diferentes soluciones con posibilidades acústicas.

5. REFERENCIAS

[1] Naciones Unidas, “Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para Desarrollo Sostenible”, 2015. [Consulta 12 septiembre 2023] <https://sdgs.un.org/es/2030agenda>

[2] Collias, D. I., James, M., & Layman J. “Circular Economy of Polymers: Topics in Recycling Technologies.” American Chemical Society, (Washington DC, EUA): 2021. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/bk-2021-1391.ch001>

[3] Ecoembes, “España recicló más de 1.6 millones de toneladas de envases domésticos de plástico, metal, briks y papel y carton en 2022”, *Publicación digital*, 2023. [Consulta 12 septiembre 2023] <https://www.ecoembes.com/es/datos-de-reciclaje-2022>

[4] España, “R.D. 1055/2022, de 27 de diciembre, de envases y residuos de envases”, Boletín Oficial del Estado, num.311 2022. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/27/1055/con>

[5] Fundación SEUR. Programa DrivingChange TM/ Más cerca de la Sociedad. Tapones para una nueva vida.

<https://www.fundacionseur.org/tapones/>. [Consulta 12 septiembre 2023]

[6] AENOR (2021), UNE-EN ISO 10140-2:2022. “Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo”. Madrid:AENOR

[7] del Rey, R.; Alba, J.; Rodríguez, J.C.; Bertó, L. Characterization of New Sustainable Acoustic Solutions in a Reduced Sized Transmission Chamber. *Buildings* **2019**, *9*, 60. <https://doi.org/10.3390/buildings9030060>

[8] Del Rey, R., Alba, J., Llopis, A., Guillem. I., “Propuesta de soluciones ligeras para aislamiento acústico basadas en nanofibras y Green composites.” 46º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, European Symposium on virtual acoustics and ambisonics, (Valencia, España), 2015.

[9] AENOR (2003), UNE-EN ISO 354:2004. “Acústica, Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”. Madrid:AENOR

[10] del Rey, R., Alba, J., Bertó, L., & Gregori, A. “Small-sized reverberation chamber for the measurement of sound absorption”. *Materiales De Construcción*, *67*(328), e139, 2017

[11] AENOR (2020), UNE-EN ISO 717-2:2021. “Acústica, Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos”. Madrid:AENOR

DISPOSITIVO ELECTROACÚSTICO PARA LA MEDIDA DE LA POROSIDAD DE MATERIALES POROSOS

Jesús Alba Fernández^{1*}
Juan Carlos Rodríguez Vercher¹
Rodolfo Gustavo Venegas Castillo²
Jorge Patricio Arenas Bermúdez²

¹Universitat Politècnica de Valencia, Escuela Politècnica Superior de Gandia

²Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

RESUMEN

Un parámetro de gran interés de los materiales absorbentes acústicos es su porosidad abierta, que comúnmente se conoce como porosidad. La porosidad se refiere a la relación del volumen de fluido ocupado respecto al volumen total de material poroso. Existen varios modelos predictivos de materiales absorbentes que se basan en este parámetro. Además, se suele necesitar para poder corregir su efecto en la resistividad al flujo del absorbente acústico.

Existen técnicas de medidas de diversa índole: técnicas basadas en la diferencia de presiones, en la saturación de líquidos, medidas por ultrasonidos, métodos ópticos, etc. Todas estas técnicas suelen ser complicadas o poco accesibles.

En este trabajo se presenta una propuesta de dispositivo para obtener la porosidad, midiendo previamente la impedancia eléctrica total, ofreciendo un procedimiento sencillo para el caso de materiales porosos. Se muestran algunos resultados obtenidos con materiales convencionales.

ABSTRACT

A parameter of great interest of sound-absorbing materials is their open porosity, commonly referred to as porosity. Porosity refers to the ratio of the volume of fluid occupied to the total volume of porous material. Several predictive models of absorptive materials are based on this parameter. In addition, it is often needed to correct for its effect on the flow resistivity of the sound absorber.

There are measurement techniques of various kinds: techniques based on pressure difference, liquid saturation, ultrasonic measurements, optical methods, etc. All these techniques are usually complicated or not very accessible.

In this work, we propose a device to obtain the porosity, previously measuring the total electrical impedance, offering a simple procedure for porous materials. Some results obtained with conventional materials are shown.

Palabras Clave— materiales, porosidad, absorción sonora, modelos acústicos, caracterización de materiales.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de modelos de predicción del comportamiento acústico de materiales absorbentes es de gran interés desde hace varios años, y sigue estando de actualidad, puesto que aparecen progresivamente nuevos materiales menos agresivos con el medio ambiente. Existen tanto modelos en el dominio temporal como el frecuencial, siendo éstos últimos más comunes. Normalmente, estos modelos [1–5] permiten obtener la impedancia característica y constante de propagación, de este tipo de medio a partir de parámetros físicos del material. En ellos se busca la caracterización completa de materiales porosos o fibrosos, a partir de diferentes parámetros tales como la porosidad, las densidades de fibra, la densidad del material, el módulo de compresibilidad, la resistencia específica al flujo, el factor de estructura, la tortuosidad, etc. Cada uno de estos modelos presenta sus propias limitaciones y sólo se puede utilizar bajo ciertas condiciones.

No obstante, en términos generales, parece haber dos grandes grupos: los que utilizan como parámetros clave la resistencia al flujo y los que utilizan como parámetro relevante la porosidad.

Entre los modelos en el dominio de la frecuencia que utilizan como parámetro relevante la porosidad hay citar los modelos empíricos de Voronina y aplicaciones [6–10].

* **Autor de contacto:** jesalba@fis.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Modelos conocidos como el JCAL también necesitan de éste y otros parámetros [11–14].

En este trabajo se evalúan dos dispositivos electroacústicos, uno pequeño y uno grande, que permiten obtener la porosidad a partir de la medición de su impedancia eléctrica total.

2. DISPOSITIVO ELECTROACÚSTICO PARA LA MEDIDA DE LA POROSIDAD

El dispositivo electroacústico es básicamente una caja cerrada donde se introduce el material absorbente acústico para ensayar (Figura 1). El circuito equivalente acústico se muestra en la Figura 2.

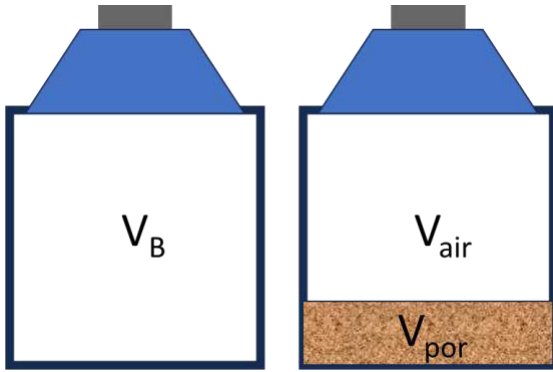


Figura 1. Sistema electroacústico.

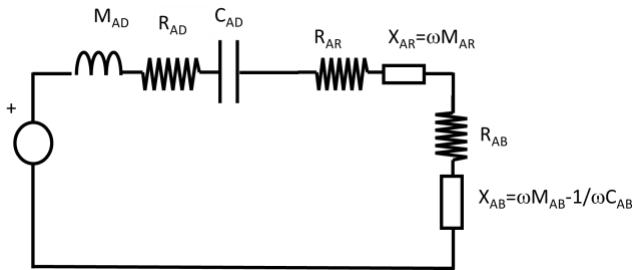


Figura 2. Circuito equivalente acústico.

El procedimiento se basa en la medida de la frecuencia de resonancia de la caja vacía (f_{emp}) y de la medida de la frecuencia de resonancia de la caja con el material absorbente en su interior (f_{mat}). En el caso de caja vacía la pulsación de resonancia es:

$$\omega_{emp} = \frac{1}{\sqrt{(M_{AD} + M_{AR} + M_{AB})C_{AT}}} \quad (1)$$

Donde M_{AD} representa el efecto acústico de la masa mecánica del altavoz (M_{MD}), M_{AR} la masa acústica correspondiente a la impedancia de radiación trasera, M_{AB} la masa acústica del

efecto de radiación en el interior de la caja, y C_{AT} es la agrupación en serie de la compliancia acústica del altavoz (C_{AD}) y la compliancia acústica de la caja (C_{AB}):

$$\frac{1}{C_{AT}} = \frac{1}{C_{AD}} + \frac{1}{C_{AB}} \quad (2)$$

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma P_0} \quad (3)$$

M_{AD} y C_{AD} son parámetros Thiele -Small del altavoz que se pueden encontrar en el propio catálogo, γ es la relación entre calores específicos, y P_0 es la presión ambiente. V_B representa al volumen de la caja. En el caso de la caja con absorbente en su interior (Figura 1), la pulsación de resonancia es:

$$\omega_{mat} = \frac{1}{\sqrt{(M_{AD} + M_{AR} + M_{AB})C'_{AT}}} \quad (4)$$

La parte de masa se puede suponer que se mantiene prácticamente igual, y cambia la compliancia acústica total, C'_{AT} , que se obtiene a partir de la relación:

$$\frac{1}{C'_{AT}} = \frac{1}{C_{AD}} + \frac{1}{C_{Aup}} \quad (5)$$

$$C_{Aup} = \frac{V_{air}}{\gamma P_0} + \frac{V_{por}\phi^2}{P_0} \quad (6)$$

C_{Aup} representa la compliancia acústica conjunta del volumen de aire V_{air} y del volumen que ocupa el material poroso V_{por} , cumpliéndose que $V_B = V_{por} + V_{air}$. ϕ representa la porosidad del material absorbente. Tanto la relación (3) como la (6) sólo se cumplen a baja frecuencia, donde se pueden suponer elementos concentrados, y el módulo de compresibilidad del material poroso es aproximadamente $\frac{P_0}{\phi}$.

Del cociente de ambas pulsaciones (4) y (1):

$$\left(\frac{f_{mat}}{f_{emp}}\right)^2 = \frac{C_{AT}}{C'_{AT}} \quad (7)$$

Despejando:

$$V_{Aup} = \frac{1}{\left(\frac{f_{mat}}{f_{emp}}\right)^2 \left(\frac{1}{V_{AS}} + \frac{1}{V_B}\right) - \frac{1}{V_{AS}}} \quad (8)$$

V_{AS} es el volumen acústico equivalente del altavoz, que también es un parámetro de Thiele-Small. De la expresión (6) se puede deducir que:

$$V_{Aup} \approx V_{air} + \gamma V_{por}\phi^2 \quad (9)$$

Se obtiene la porosidad combinando y despejando (8) y (9):

$$\phi \approx \sqrt{\frac{V_{Aup} - V_{air}}{\gamma V_{por}}} \quad (10)$$

El error del modelo depende de V_{AS} , la medida de $V_{por} = d \cdot S_d$ y la determinación del volumen $V_B = V_{por} + V_{air}$, además de la condición de baja frecuencia.

3. PROTOTIPOS

Se han construido dos prototipos diferentes. El primer prototipo se muestra en la Figura 3. Es un prototipo de volumen pequeño, impreso en 3D, de 0.90 l, donde las muestras tienen 10 cm de diámetro. Para el prototipo se monta un altavoz Fonestar de 4" modelo 4FR40.



Figura 3. Prototipo de volumen pequeño.

El segundo prototipo es de un volumen bastante superior para muestras grandes. Tiene un volumen de 119.9 l, para muestras de $50.9 \times 50.9 \text{ cm}^2$. En este caso se monta un altavoz Beyma 15K200.



Figura 4. Prototipo de volumen grande.

4. RESULTADOS

Se realizan pruebas iniciales en los dos prototipos. En el caso del prototipo pequeño, se muestra en la Figura 5 la medida de la impedancia eléctrica total Z_{ET} con el dispositivo vacío (línea continua) y con una muestra de 4 cm de foam aglomerado de 80 kg/m^3 (línea discontinua). Puede verse la frecuencia de resonancia de 198.47 Hz del sistema vacío. En ese caso se obtiene una porosidad de 0.958. Se realiza también una medición con lana de poliéster de 3.5 cm de espesor, obteniendo una porosidad de 0.889.

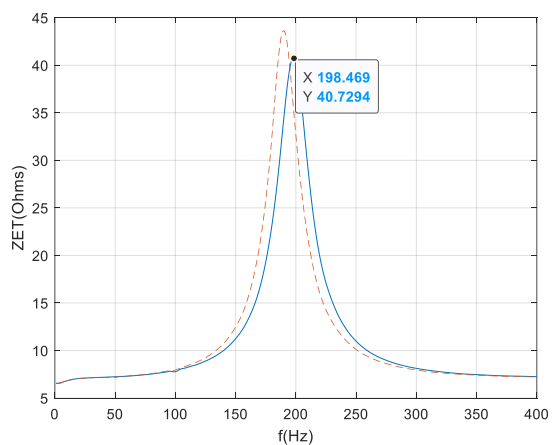


Figura 5. Resultados de impedancia eléctrica total en el dispositivo pequeño.

Para el prototipo grande también se realizan las mismas medidas. En la Figura 6 se muestra la medida de impedancia eléctrica total de la caja vacía (línea continua) y con una muestra de lana de poliéster de 3.5 cm de las mismas características. Se observa una frecuencia de resonancia de 66.77 Hz en el caso del sistema vacío. Se obtiene una porosidad de 0.842 para este material. Se realiza la misma prueba para el mismo foam aglomerado de 4 cm obteniendo 0.969 de porosidad.

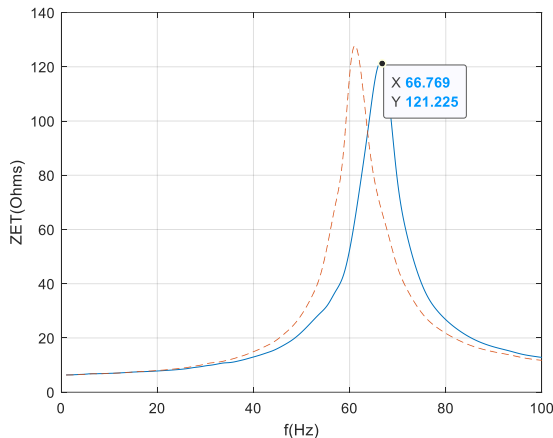


Figura 6. Resultados de impedancia eléctrica total en el dispositivo grande.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

Se han construido dos prototipos electroacústicos para la medida de la porosidad, uno de volumen pequeño para muestras circulares de 10 cm de diámetro y otro de volumen grande para muestras cuadradas de 0.5 x 0.5 m². Existe mayor necesidad de material en el dispositivo grande, como es obvio. Puede verse que en ambos casos la medida es sencilla, que los valores obtenidos para ambos materiales son similares, aunque no da exactamente lo mismo. Son varias las razones que pueden producir la divergencia. En el dispositivo pequeño el efecto de borde será mayor que en el grande. El corte para este dispositivo será más sensible. También el ajuste del volumen del dispositivo. El efecto del espacio que puede ocupar el altavoz se debe considerar. Además, también depende del parámetro V_{AS} de cada altavoz que debe ajustarse con seguridad en cada aparato.

Como futuras líneas, se va a definir un procedimiento de calibración para ajustar cada dispositivo y ampliar los materiales y número de ensayos, aunque a priori se obtienen valores coherentes.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Social Europeo y la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y

Sociedad - Generalitat Valenciana, a través del programa ACIF-2020 (ACIF/2020/401).

7. REFERENCIAS

- [1] M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," *Appl. Acoust.*, vol. 3, no. 2, pp. 105–116, 1970.
- [2] J. Allard and Y. Champoux, "New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, no. 6, pp. 3346–3353, Jun. 1992.
- [3] K. Attenborough, "Acoustical characteristics of porous materials," *Phys. Rep.*, vol. 82, no. 3, pp. 179–227, Feb. 1982.
- [4] K. Attenborough, "Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73, no. 3, pp. 785–799, Mar. 1983.
- [5] N. Voronina, "Acoustic properties of fibrous materials," *Appl. Acoust.*, vol. 42, no. 2, pp. 165–174, Jan. 1994.
- [6] N. Voronina, "Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material," *Appl. Acoust.*, vol. 48, no. 2, pp. 121–132, Jun. 1996.
- [7] N. Voronina, "An empirical model for elastic porous materials," *Appl. Acoust.*, vol. 55, no. 1, pp. 67–83, Sep. 1998.
- [8] N. Voronina, "An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity," *Appl. Acoust.*, vol. 51, no. 2, pp. 181–198, Jun. 1997.
- [9] N. . Voronina and K. . Horoshenkov, "A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media," *Appl. Acoust.*, vol. 64, no. 4, pp. 415–432, Apr. 2003.
- [10] R. del Rey, J. Alba, J. P. Arenas, and V. J. Sanchis, "An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam," *Appl. Acoust.*, vol. 73, no. 6–7, pp. 604–609, Jun. 2012.
- [11] D. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media," *J. Fluid Mech.*, vol. 176, pp. 379–402, 1987.
- [12] Y. Champoux and J.-F. Allard, "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media," *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 4, pp. 1975–1979, 1991.
- [13] D. Lafarge, P. Lemarinier, J. F. Allard, and V. Tarnow, "Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, no. 4,

pp. 1995–2006, 1997.

[14] S. R. Pride, F. D. Morgan, and A. F. Gangi, “Drag forces of porous-medium acoustics,” *Phys. Rev. B*, vol. 47, no. 9, pp. 4964–4978, Mar. 1993.

MEDICIÓN DE PARÁMETROS MECÁNICOS DE NUEVOS ECO-MATERIALES PARA MODELOS DE PREDICCIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

Romina del Rey Tormos^{*1}

Jesús Alba Fernández¹

Víctor Atienza Soler¹

¹ Escola Politècnica Superior de Gandía. Centro de Tecnologías Físicas. Universitat Politècnica de València. c/Paranimf, 1. 46730, Grao de Gandía, España.

RESUMEN

En este trabajo se propone un procedimiento experimental basado en métodos resonantes para la caracterización mecánica de nuevos eco-materiales. La necesidad de incorporar nuevos materiales ecológicos en la ingeniería de la construcción es cada día más urgente, siguiendo el camino marcado por la Unión Europea H2030. La normativa vigente para determinar parámetros mecánicos de materiales, está pensada para materiales homogéneos e isotrópicos, características que no suelen poseer los nuevos eco-materiales, por su propia naturaleza. Es necesario conocer los parámetros mecánicos para poder evaluar modelos de predicción de aislamiento acústico en la edificación. En este trabajo se muestran resultados comparativos de parámetros mecánicos obtenidos a partir de métodos normativos (ISO) y obtenidos a partir de un procedimiento experimental basado en métodos resonantes. Se presentan también valores del aislamiento acústico a ruido aéreo de estos nuevos eco-materiales, en función de los parámetros mecánicos obtenidos.

ABSTRACT

This work proposes an experimental procedure based on resonant methods for the mechanical characterization of new eco-materials. The need to incorporate new ecological materials in construction engineering is becoming increasingly urgent, following the path set by the European Union H2030. The current regulations for determining mechanical parameters of materials are designed for homogeneous and isotropic materials, characteristics that are not typically found in new eco-materials due to their nature. It is necessary to know the mechanical parameters in order to evaluate predictive models for sound insulation in buildings. This work presents comparative results of mechanical parameters obtained from normative methods (ISO) and obtained from an experimental procedure based on resonant methods. It also presents values of airborne sound insulation of these new eco-materials, based on the determined mechanical parameters.

Palabras Clave— eco-materiales, frecuencia de resonancia, módulo de young, aislamiento acústico.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de incorporar nuevos materiales ecológicos en la ingeniería de la construcción es cada día más urgente, siguiendo el camino marcado por la Unión Europea [1]. En los laboratorios de acústica del Centro de Tecnologías Físicas del Campus de Gandía, de la Universitat Politècnica de València, se busca trabajar por una economía verde y un desarrollo sostenible, de forma que nuevos eco-materiales puedan ser introducidos en el ámbito de la ingeniería civil, aportando beneficios sociales y medioambientales. Ya existen estudios previos de nuevos materiales obtenidos a partir de reciclado de productos o de fibras naturales [2-8]. De esta forma, a través de la transformación ecológica es posible llegar a una economía verde y circular. Con el desarrollo de estas nuevas soluciones es posible ayudar a acabar o disminuir la pobreza (ODS1): Existen algunas zonas del planeta, donde plantas consideradas como maleza o especies invasivas pueden ser una opción de crecimiento económico sostenible y trabajo decente (ODS 8), algunos ejemplos son la planta *Eryngium paniculatum* en gran parte de Chile, o en la Comunidad Valenciana, la gestión sostenible de los residuos de la recolección del cultivo de arroz, evitando generar toneladas de CO a la atmósfera (ODS 3, ODS 13). El poder validar estos nuevos materiales como parte de soluciones acústicas, además reduciría desigualdades entre países o regiones (ODS 10). Las soluciones elaboradas a partir de fibras naturales, o de residuos (base reciclada) servirán para combatir problemas de ruido en edificación o ingeniería civil (ODS3), así como también contemplarán aspectos térmicos (ODS 7), fomentarán la innovación (ODS 9), con una producción sostenible (ODS 12) hacia el diseño de ciudades sostenibles (ODS 11).

Todas estas soluciones deberán cumplir con las normativas de construcción en vigor. A nivel estatal es el Código Técnico de la Edificación (CTE) [9], desarrollado por disposición de la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE) a través de los Documentos Básicos la que regula las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios y sus instalaciones. Es necesario pues un re-enfoque de soluciones tecnológicas, normativa y modelado, ya que, la mayoría de modelos, de prototipos tecnológicos y de normativa vigente, al menos en el ámbito de la construcción, están pensados para el uso de materiales

^{*} **Autor de contacto:** roderey@fis.upv.es.

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

“tradicionales”. Los materiales tradicionales suelen ser homogéneos e isotrópicos, características que no presentan los nuevos eco-materiales, por su propia naturaleza. Son muchos los autores que han evaluado los parámetros mecánicos de nuevos materiales sostenibles mediante normativas “clásicas” (ISOS) [10,11], con éxito [12-19], estos ensayos suelen ser destructivos. En los laboratorios de acústica del Campus de Gandia de la Universitat Politècnica de València, con el desarrollo de nuevos materiales, en muchas ocasiones, ni se cuenta con suficiente cantidad de muestra, ni se pueden conseguir las probetas de las dimensiones marcadas por la normativa [10,11]. En este trabajo se propone un procedimiento experimental basado en métodos resonantes para la caracterización mecánica de nuevos eco-materiales. Todas las probetas utilizadas son muestras circulares de 80mm de diámetro. Se obtiene el módulo de Young a partir de curvas de resonancia en función de la frecuencia de algunas muestras eco-sostenibles y de otras muestras de materiales clásicos, que se toma como referencia. A partir del valor del módulo de Young, se obtiene el factor de pérdidas y es posible, a partir de modelados de aislamiento acústico a ruido aéreo obtener el índice de reducción sonora R (dB).

2. MÉTODO RESONANTE

El procedimiento experimental utilizado se basa en el cálculo de la función de transferencia en función de la frecuencia $H(f)$ entre desplazamiento, y fuerza:

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (1)$$

Siendo: X(f) el desplazamiento en función de la frecuencia (m) y F(f) la fuerza en función de la frecuencia (N).

Se excita con un shaker la muestra (fuerza) sometida a estudio y se registra con un acelerómetro la aceleración. A partir de las medidas de aceleración, se obtienen valores de desplazamiento, con dos pasos de integración. Las posiciones tanto de shaker como de acelerómetro han sido estudiadas con detalle para ver en que posiciones de excitación/registro se obtenía menor dispersión de las medidas. En la Figura 1 se muestra el dispositivo de ensayo, en la Figura 2 se muestra en detalle una de las muestras utilizadas para la puesta a punto de este procedimiento de ensayo.

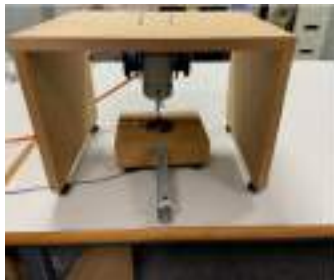


Figura 1. Dispositivo (plataforma) de ensayo para la obtención de parámetros mecánicos.



Figura 2. Detalle de una de las muestras de ensayo. Ejemplo de matriz de divisiones en una muestra para evaluación de la dispersión de los ensayos.

En la Figura 3 se muestra una curva experimental como ejemplo. En la ecuación (2) se muestra la relación entre la frecuencia de resonancia y la rigidez dinámica, k:

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

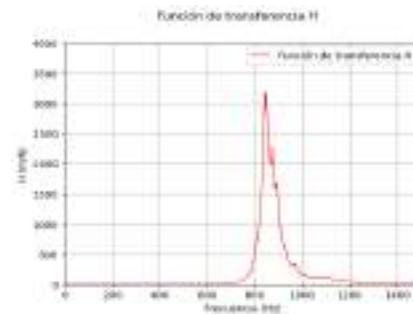


Figura 3. Función de transferencia experimental.

Reescribimos la ecuación en función de la frecuencia de resonancia, f_0 (Hz) como, (siendo m la masa de la muestra en Kg):

$$k = 4 \cdot m \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \quad (3)$$

A partir de la f_0 y de la caída en (+/-) 3 dB (Δf_{3dB}) también es posible conocer el valor del factor de pérdidas, η , adimensional:

$$\eta = \frac{\Delta f_{3dB}}{f_0} \quad (4)$$

Es posible conocer el valor del Módulo de Young, E (Pa) a partir de la ecuación (5):

$$E = \frac{0.99 \cdot a^4 \cdot f_n^2 \cdot \rho}{c^2 \cdot n^4 \cdot e_0^2} \quad (5)$$

Siendo: a el radio de la placa (m), f_n es la frecuencia de resonancia del material en las condiciones de ensayo, ρ la densidad del material (Kg/m^3), c un coeficiente que depende de las condiciones de

contorno (0.172) [20], n el número de modo de la placa con valor 1 y e_0 el espesor de la placa (m).

3. RESULTADOS MECÁNICOS

3.1. Materiales utilizados.

Se muestran en este trabajo los resultados de valores de parámetros mecánicos obtenidos mediante el método resonante expuesto en el apartado anterior de 3 materiales; dos de estos materiales son eco-materiales elaborados a partir de fibras naturales (fibras de naranjo y fibras de yute) y un tercer material elaborado de yeso común. Se ha decidido utilizar también en el estudio un material comúnmente utilizado en la edificación para poder tener sus valores como referencia. En la Figura 5 se muestran las probetas de estos materiales utilizadas en los ensayos de parámetros mecánicos.



Figura 5. Muestras utilizadas en el estudio de la obtención de parámetros mecánicos a partir del método resonante.

Algunas características de estas muestras se detallan a continuación.

- Composite elaborado a partir de fibras de naranjo (MP30%): composite elaborado a partir de una matriz polimérica, un 30% de fibras naturales de naranjo y un 6% de pasta mecánica con un compuesto orgánico. La placa sometida a ensayo es una probeta circular de 80 mm de diámetro, 4 mm de espesor y 2323 kg/m³ de densidad.
- Composite elaborado a partir de fibras vegetales de yute: composite elaborado a partir de fibras de yute (densidad de fibras de 0.70%) y resina epoxy para laminación comercial. La placa sometida a ensayo es una probeta circular de 80mm de diámetro, 5 mm de espesor y 2293 kg/m³ de densidad.
- Placa de yeso: placa de yeso comercial de 13mm de espesor y 80 mm de diámetro, con dos capas de celulosa para ofrecer un mejor acabado en la instalación habitual. Tiene una densidad de 1128 kg/m³.

3.2. Parámetros mecánicos obtenidos mediante el método resonante.

Para obtener los parámetros mecánicos a partir del método resonante de los 3 materiales elegidos, se realiza un promedio de 6401 registros de acelerómetro/shaker por probeta. Se ha seguido un mapeado de posiciones siguiendo la matriz de divisiones que se observa en la Figura 2. Al menos, se han utilizado 3 probetas por cada material, y los ensayos se han realizado en distintas

disposiciones de la plataforma de ensayo, determinando que los ensayos con menor dispersión han sido los elaborados con la plataforma en el suelo (y no sobre una mesa), evitando así posibles transmisiones de la vibración o la aparición de ondas transversales por los efectos de borde de las mesas de trabajo.

En la Tabla 1 se muestran los resultados experimentales del módulo de Young y del factor de pérdidas. En la misma tabla se muestran los valores del módulo de Young de referencia. El error asociado a los valores experimentales se ha obtenido a partir de la teoría básica de errores.

Tabla 1. Tabla comparativa de resultados experimentales y valores de referencia de los parámetros mecánicos.

Material	E Referencia [GPa]	E Experimental. [GPa]	Loss Factor
Composite Fibras Naranjo (MP30%)	3,7	4 ± 0,5	0,106
Composite Fibras Yute	2,5 ± 0,1	3,2 ± 0,3	0,040
Placa Yeso	0,35 ± 0,07	0,34 ± 0,02	0,022

Los valores del módulo de Young (E) de referencia que se muestran en la segunda columna de la Tabla 1, se han obtenido de las siguientes fuentes:

- Valor del módulo de Young de referencia de la placa de composite de fibras de naranjo (MP30%): Estudio detallado en [7] donde se realizó el ensayo mecánico destructivo siguiendo la norma americana ASTM D638 standard.
- Valor del módulo de Young de referencia de la placa de fibras de yute: ensayos realizados en la Escuela Politécnica Superior de Alcoy-Universitat Politècnica de València, según [11].
- Valor del módulo de Young de la placa de yeso: [21]

4. ESTIMACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

Es posible conocer el índice de reducción sonora, R (dB), a partir del coeficiente de transmisión, $\tau(\theta)$. Este coeficiente representa la relación entre la energía transmitida y la energía incidente, y presenta una dependencia con el ángulo de incidencia.

Siguiendo las directrices marcadas en otros autores [7,22 ,23] y el procedimiento detallado en [24], se obtiene la predicción al aislamiento acústico de las placas de fibra de naranjo, de fibras de yute y de yeso. En la Figura 6 se muestran estos resultados. En la Figura 7 se muestran los resultados de los valores de aislamiento a ruido aéreo, de las simulaciones considerando las 3 placas del

mismo espesor, 13mm, valor típico de las placas de yeso comúnmente utilizadas en edificación.

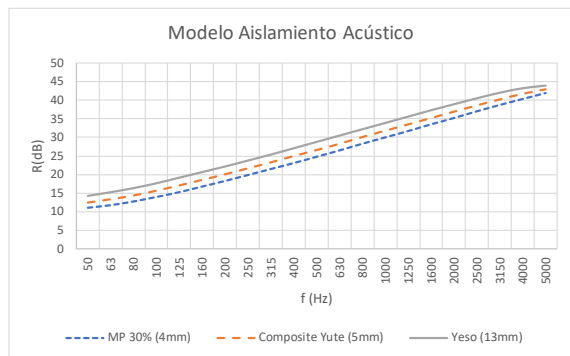


Figura 6. Estimación del aislamiento acústico a ruido aéreo, R (dB) de las 3 placas estudiadas en este trabajo.

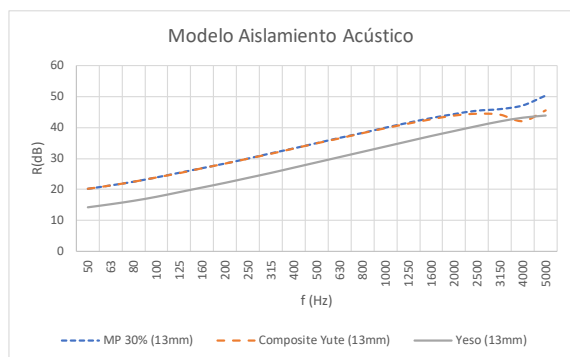


Figura 7. Estimación del aislamiento acústico a ruido aéreo, R (dB) de las 3 placas estudiadas en este trabajo, considerando todas las placas de 13mm de espesor.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un procedimiento experimental basado en métodos resonantes para la caracterización mecánica de nuevos eco-materiales. A partir del método propuesto se han podido obtener valores del módulo de Young de tres materiales distintos bastante similares a los valores que se tenían de referencia obtenidos por distintos métodos. Este trabajo ha servido para poner en marcha un nuevo método resonante no destructivo y adaptado a la geometría de las probetas que suelen llegar a nuestros laboratorios. A partir de los valores experimentales, además, podemos obtener el factor de pérdidas que, junto a parámetros mecánicos, nos permite estimar el valor del aislamiento acústico a ruido aéreo, R(dB). Estas predicciones han demostrado que, con un mismo espesor, las placas de eco-composites (en concreto de fibras de naranjo y fibras de yute) pueden presentar valores de aislamiento acústico comparables, e incluso superiores a los valores de aislamiento que presentan las placas de yeso, tradicionalmente utilizadas en acústica de la edificación, como parte de soluciones acústicas. Se abre de esta forma un abanico de posibilidades de nuevas soluciones acústicas sostenibles, apostando por una economía circular y en línea con la estrategia de la Unión Europea (H2030).

12. REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, “Transformar nuestro mundo: La agenda 2030 para Desarrollo Sostenible”, 2015, <<https://sdgs.un.org/es/2030agenda>> [Consulta: 12 de septiembre de 2013].
- [2] J. Ramis, R. del Rey, J. Alba, L. Godinho, J. Carbajo. “A model for acoustic absorbent materials derived from coconut fiber”. *Materiales de Construcción*, vol. 313, no.64, pp. 1 – 7, 2014.
- [3] R. del Rey, J. Alba, V. Sanchis. “An empirical modeling of porous sound absorbing materials made of recycled foam”, *Applied Acoustics*, vol. 73, pp. 604 – 609, 2012.
- [4] R. del Rey, J. Alba, J. Ramis, V. Sanchis, “Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico”. *Materiales de Construcción*, vol. 61, no. 304, pp. 547 – 558, 2011.
- [5] J. Ramis, J. Alba, R. del Rey, E. Escuder, V.J. Sanchis. Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de kenaf, *Materiales de Construcción*, vol. 60, no. 299, pp. 133 – 143, 2010.
- [6] R. Reixach, R. del Rey, J. Alba, G. Arbat, F.X. Espinach, “Acoustic properties of agroforestry waste orange pruning fibers reinforced polypropylene composites as an alternative to laminated gypsum boards”, *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 124 – 129, 2015.
- [7] J. Jorge, R. del Rey, J. Alba, R. Oltra, “Sound-Absorption Properties of Materials Made of Esparto Grass Fibers”. *Sustainability*, vol. 12, no. 14, pp. 5533, 2020.
- [8] R. del Rey; A. Uris; J. Alba; P. Candelas, “Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications”, *Materials*, vol. 10, no. 11, pp. 1277, 2017.
- [9] Documento Básico de Protección Frente al Ruido del Código Técnico de la Edificación (DB-HR del CTE)
- [10] AENOR (2020). “Materiales metálicos, Ensayo de tracción, Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.”. UNE-EN ISO 6892-1:2020. Madrid: AENOR.
- [11] AENOR (2022). “Plásticos, Determinación de las propiedades en tracción, Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras.”, UNE-0EN ISO 527-4:2022. Madrid: AENOR.
- [12] M. Peydró, F. Parres, J. Crespo, R. Navarro, “Recuperación de plásticos reciclados mediante adición de elastómeros termoplásticos. Caracterización mecánica y térmica”, *Tecnología de materiales*, vol. 87, no. 5, pp. 526-532, 2012.
- [13] J. Gomez-Caturla, R. Balart, J. Ivorra, D. Garcia, F. Dominici, D. Puglia and T. Luigi, “Biopolypropylene-Based Wood Plastic Composites Reinforced with Mango Peel Flour and Compatibilized with an Environmentally Friendly Copolymer from Itaconic Acid,” *ACS applied polymer materials*, vol. 4, no. 6, pp. 4398–4410, 2022.

[14] J. Gomez-Caturla, D. Lascano, N. Montanes, R. Balart, F. Dominici, D. Puglia and L. Torre, “Manufacturing and characterization of highly environmentally-friendly composites with polylactide matrix /and mango kernel seed flour”, *Express polymer letters*, vol. 17, no. 3, pp. 334–351, 2023.

[15] D. García García, A. Carbonell Verdú, A. Jorda-Vilaplana, R. A. Balart Gimeno, and D. García Sanoguera, “Development and characterization of green composites from bio-based polyethylene and peanut shell”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, no.37, 2016.

[16] C. Dolça, E. Fages, E. Gongá, D. Garcia-Sanoguera, R. Balart, and L. Quiles-Carrillo, “The Effect of Varying the Amount of Short Hemp Fibers on Mechanical and Thermal Properties of Wood-Plastic Composites from Biobased Polyethylene Processed by Injection Molding”, *Polymers*, vol. 14, no. 1, pp. 138, 2021.

[17] Á. Agüero, E. Corral, S. Abarca, D. Lascano, M. de la Fuente, M. Peltzer, R. Balart and M. Arrieta, “Plasticized Mechanical Recycled PLA Films Reinforced with Microbial Cellulose Particles Obtained from Kombucha Fermented in Yerba Mate Waste”, *Polymers*, vol. 15, no. 2, pp. 285–, 2023.

[18] M. D. Samper Madrigal, R. Petrucci, L. Sánchez Nacher, R. A. Balart Gimeno, and J. M. Kenny, “Properties of composite laminates based on basalt fibers with epoxidized vegetable oils”, *Materials & Design*, vol. 72, pp. 9-15, 2015.

[19] D. S. Lascano-Aimacaña, R. Balart, D. Garcia-Sanoguera, Á. Agüero-Rodríguez, T. Boronat, and N. Montanes, “Manufacturing and Characterization of Hybrid Composites with Basalt and Flax Fabrics and a Partially Bio-based Epoxy Resin”, *Fibers and Polymers*, vol. 22, no.3, pp. 751-763, 2021.

[20] M. Recuero Lopez, “Ingeniería Acústica”, *Ediciones Paraninfo*, S.A, Madrid, septiembre de 1991.

[21] Alonso Vera, Juan Antonio; Reyes Pozo, Encarnación; Gálvez Ruiz, Jaime. (2011) Caracterización del comportamiento en fractura de paneles sándwich de placas de yeso laminado y lana de roca, En: “XXVIII Encuentro del Grupo Español de Fractura”, 06/04/2011 - 08/04/2011, Gijón, España.
<<https://gef.es/images/publicaciones/28/Anales28-011.pdf>>
[Consulta: 11 de septiembre de 2023].

[22] T.E. Vigran, “Predicting the sound reduction index of finite size specimen by a simplified spatial windowing technique”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 325, no. 3, pp. 507-512, 2009.

[23] S. Schoenwald, E. Gerretsen, and H. J. Martin, “Prediction of the Sound Transmission Loss of Multi-layered Small Sized Elements”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5_Supplement, pp. 3500–, 2008.

[24] J. Sanchis, Ernesto; R. Rey; L. Bertó; J. G. Segura; J. Gadea; J. Alba. Preliminary Results of the Research Project Entitled “Development of New Eco-materials and Sustainable Solutions based on the Use of Waste and Renewable Raw Materials in Building Acoustics”. *EN 22nd International Congress on Sound and Vibration, Acoustical Society of Italy*, (Florencia, Italia), vol. 1 – 8, 2015.

ESTUDIOS SOBRE LA INFLUENCIA DEL ESPESOR EN LA FRECUENCIA MÁXIMA DE ABSORCIÓN DE ABSORBENTES POROSOS

Valentín Gómez Escobar^{1*}
Celia Moreno González¹
Guillermo Rey-Gozalo¹

¹ Laboratorio de Acústica, Departamento de Física Aplicada & Instituto Universitario de Investigación para el Desarrollo Territorial Sostenible (INTERRA). Universidad de Extremadura. Avda. Universidad, s/n 10003 Cáceres, España. valentin@unex.es; celiamg@unex.es; guille@unex.es

RESUMEN

Es conocido que la absorción acústica de los materiales porosos colocados junto a una terminación rígida se ve influida por el espesor de las muestras porosas, dado que ello implica que los máximos de velocidad de ondas de menores frecuencias pueden incluirse en el seno del material.

En este trabajo se presentan resultados de los trabajos realizados, sobre la influencia del espesor de la muestra en la absorción acústica de materiales porosos que se han llevado a cabo con diferentes materiales porosos o fibrosos. Se han realizado experiencias con diferentes materiales tanto comerciales, como fabricados a partir de residuos (en particular, con colillas de cigarrillos usadas).

Los resultados muestran un comportamiento que, si bien es similar, presenta, a su vez, diferencias significativas.

ABSTRACT

It is known that thickness affects the acoustic absorption of porous materials placed next to a rigid termination, as the increase of thickness implies that more maximum values of particle speed (with lowest frequencies) are included within the material.

In this work, results of the studies carried out on the influence of the thickness of the sample on the acoustic absorption of some porous materials (both cellular and fibrous ones) are carried out. Experiments have been carried out with different materials, some commercial and other made using waste residues (in particular, used cigarette butts).

The results show a behavior that, although similar, presents, at the same time, significant differences.

Palabras Clave— Absorción acústica; materiales acústicos, espesor.

1. INTRODUCCIÓN

La adecuación acústica, según su uso, de los diferentes tipos de recintos en los que desarrollamos nuestras actividades cotidianas está relacionado muy directamente con el uso de materiales porosos que permiten la propuesta de soluciones, tanto para acondicionamiento acústico, como para aislamiento acústico (en muchos casos, complementando su empleo con el uso de materiales rígidos).

Aunque, en la construcción actual, está muy extendido el uso de lanas de vidrio o de origen mineral, es también cierto que, en los últimos años han surgido numerosas propuestas de materiales absorbentes, muchos de origen vegetal y muchos otros procedentes del reciclaje de productos de desecho [1-6]. Esta propuesta surge en un intento, por un lado, de proponer nuevas alternativas de materiales constructivos y, por otro lado, de revalorizar algunos de los múltiples residuos que se generan en la sociedad actual.

Los materiales porosos acústicos se caracterizan por la existencia en ellos de conductos que se comunican directamente con el exterior. Dentro ellos podemos diferenciar diferentes tipos, según la matriz sólida que constituye los mismos. Así, se puede diferenciar entre materiales fibrosos, granulares o celulares.

Dado que el mecanismo de absorción de los materiales porosos se basa en la disipación de energía en los conductos abiertos, es claro que debe existir una influencia de la absorción acústica de estos materiales con espesor del material.

En la práctica, los materiales porosos, debido a su mal carácter como aislantes acústicos, y a su carácter no rígido, suelen ir ligados, en las diferentes soluciones constructivas a

* **Autor de contacto:** valentin@unex.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

materiales rígidos, que, por un lado, mejoren las características como aislantes de las soluciones constructivas y, por otro lado, dan la rigidez a la misma. Pero esta 'simbiosis' acarrea un problema, dado que, en materiales completamente rígidos, la velocidad de las partículas de aire en la zona en contacto con el material poroso es nula [7] lo cual implicaría que no existiría disipación acústica por el material poroso, si lo suponemos de espesor despreciable y, si tenemos en cuenta sólo la disipación por rozamiento. Para aumentar la absorción acústica conviene, por tanto, que la muestra tenga un cierto espesor, de forma que vaya incluyendo en su interior partículas de aire con velocidades de vibración no nulas y, si ello es posible, lo deseable es, para tener una absorción máxima incluir en el espesor de la muestra, partículas que estén vibrando con velocidad máxima. Dado que, si se tiene un nodo de vibración en la superficie de la pared, se tendrá un máximo de vibración a una longitud de onda de $\lambda/4$ [8] y, considerando una velocidad de propagación del sonido en el aire de 340 m/s, esto hace que para incluir en seno del material el máximo de velocidad, muchos autores indican que el espesor (e) del material, para una cierta frecuencia (f) debe ser:

$$e = \frac{85}{f} \quad (1)$$

Indudablemente, si la velocidad de propagación del sonido en el aire es diferente el factor 85, de Ec. 1, se verá alterado.

En trabajos anteriores, con muestras absorbentes porosas preparadas a partir de colillas de cigarrillos usados, se analizó la variación de la absorción acústica de las muestras, cuando variaba el espesor de la muestra, encontrándose un comportamiento que, si bien, para un rango de espesores pequeño parecía lineal, no era tal [9-10].

En este trabajo se pretende ampliar los estudios previos con muestras preparadas con filtros de cigarrillos, utilizando muestras de mayor tamaño (de 100 mm de diámetro, frente a las de 29 mm usadas en trabajos anteriores) comparando los resultados obtenidos con la ecuación teórica dada en la Ec. 1. y comparando, de igual forma, con el comportamiento con el espesor de otros materiales de carácter poroso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Equipamiento para la Caracterización Acústica de Muestras

Para la determinación del coeficiente de absorción de las diferentes muestras se ha medido con incidencia de la onda normal mediante el método de la función de transferencia establecido en la Norma ISO 10534-2 [11].

El equipo utilizado para medir las propiedades acústicas de las muestras es un tubo de impedancias modelo 4206 T de Brüel & Kjaer, un sistema multi-analizador PULSE de 4

canales de Brüel & Kjaer, modelo 3560 C, un amplificador de potencia de Brüel & Kjaer, modelo 2716 C, micrófonos $\frac{1}{4}$ de pulgada de Brüel & Kjaer, modelo 4187 y software Material Testing para Pulse de Brüel & Kjaer, modelo 7758.

El tubo de impedancia dispone de dos portamuestras de diámetros 100 mm y 29 mm, con los que se obtiene información en los rangos de frecuencia de 50 a 1600 Hz y de 500 a 6400 Hz, respectivamente.

Para el presente estudio, se ha utilizado exclusivamente el portamuestras de diámetro 100 mm, lo cual limita los resultados del mismo, tal y como se acaba e indicar, al rango de frecuencias entre 50 y 1600 Hz. Como se verá más adelante, ello implicará que algunas de las muestras medidas no podrán ayudar en el estudio de los máximos de absorción acústica, dado que, para bajos espesores, estos máximos se situarán en frecuencia por encima del límite de 1600 Hz.

En la Figura 1, se muestra un esquema del montaje utilizado, mientras en la Figura 2 se muestra una fotografía del tubo de impedancias utilizado, con el portamuestras de 100 mm.

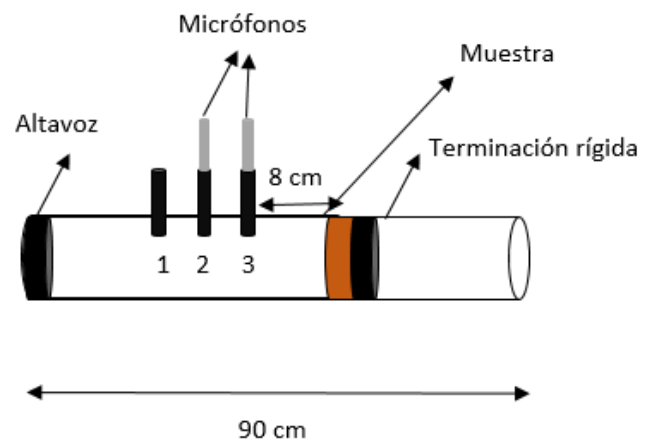


Figura 1. Esquema de la colocación de la muestra para medidas de absorción acústica.



Figura 2. Tubo de impedancias con el porta muestras de 100 mm de diámetro.

2.2. Muestras de Partida y Acondicionamiento de las Mismas

Para este trabajo se han empleado cuatro tipos de muestras diferentes:

a) Muestras de espuma (F), del tamaño del portamuestras, que se suministran con el equipo de medida como muestras de referencia. Se pueden considerar como un material poroso celular.

b) Muestras de lana mineral (M). Preparadas cortando muestras del tamaño del portamuestras de una plancha de gran tamaño de una lana mineral comercial. Se pueden considerar como un material poroso fibroso.

c) Muestras porosas preparadas a partir de colillas de cigarrillo sin disgregar (BSD). Para este tipo de muestras, se usaron filtros de 95 mm sin usar, con un diámetro de unos 8 mm, recubiertos por un papel envolvente, suministrados por una empresa especializada y estos filtros fueron cortados en diferentes tamaños. Una vez cortados, las muestras se preparan colocando, manualmente, estas colillas en el portamuestras. Se colocaron 140 colillas. Se pueden considerar como un material poroso fibroso.

d) Muestras porosas preparadas a partir de colillas usadas disgregadas mecánicamente (BDG). Para la elaboración de estas muestras, se usaron también 140 colillas de cigarrillos usados, también todas de un diámetro aproximado de 8 mm. A estas colillas se les eliminó el papel envolvente y fueron disgregadas mecánicamente. El resultado de la disgregación se coloca en el portamuestras para su medida.

En la Figura 3, se muestran fotografías de ejemplo de cada tipo de muestra incluida en este estudio

Un total de 52 muestras han sido utilizadas en este estudio, repartidas entre los cuatro tipos de muestras mencionados y diferentes espesores. En la Tabla 1, se esquematiza el número de muestras y el rango de espesores preparado para cada tipo de muestra. Se pueden considerar como un material poroso fibroso.

Tabla 1. Número de muestras y rango de espesores usados.

Muestra	Nº	Rango de espesor (mm)
F	10	24.7-99.8
M	10	26.2-112.8
BSD	26	9.5-95
BDG	16	18.14-139.9

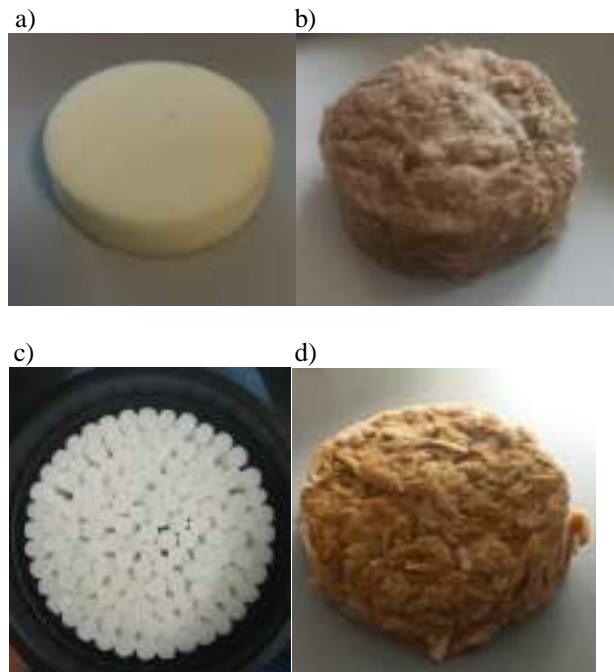


Figura 3. Fotografías de algunas de las muestras medida para el presente estudio. a) Muestras de espuma; b) muestras de lana mineral; c) muestras preparadas con colillas usadas sin disgregar; d) muestras preparadas con colillas usadas disgregadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha indicado anteriormente, se prepararon y midieron un total de 52 muestras, correspondientes a los cuatro tipos de muestras indicados anteriormente y con espesores diferentes tal y como se ha mostrado en la Tabla 1.

Los resultados de los valores de coeficiente de absorción con incidencia normal, medidos con el tubo de impedancias dejaron de manifiesto, como cabía esperarse, una clara influencia del espesor de la muestra, tanto en los valores de absorción, como en la forma de los espectros de absorción, tal como se aprecia en la Figura 4, para diferentes espesores de los cuatro tipos de muestras consideradas y descritas anteriormente.

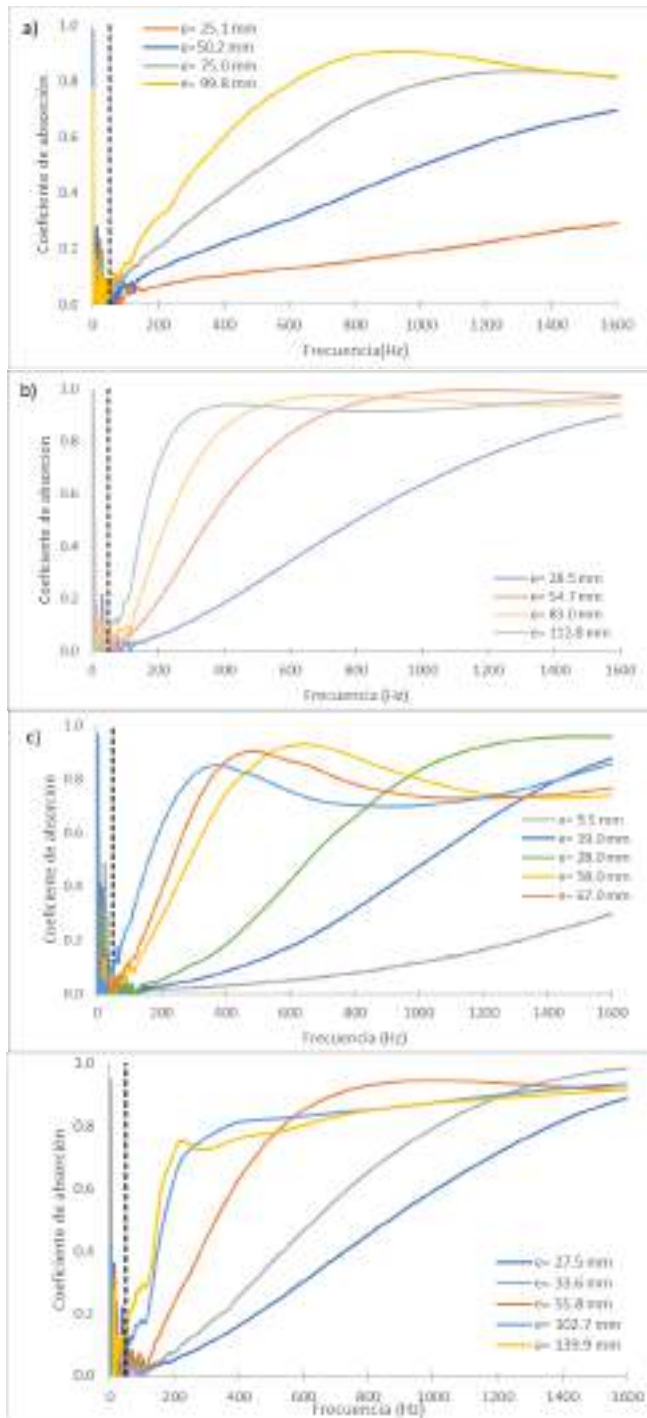


Figura 4. Valores del coeficiente de absorción para muestras de diferentes espesores de los tipos de muestras estudiados. a) Muestras de espuma; b) muestras de lana mineral; c) muestras preparadas con colillas usadas sin disgregar; d) muestras preparadas con colillas usadas disgregadas. La línea vertical discontinua muestra el valor de frecuencia de 50 Hz.

Como puede apreciarse en las gráficas que se incluyen en la Figura 4, existe un claro aumento absorción acústica con el espesor para los cuatro tipos de muestras estudiados. Si bien, para espesores bajos, el aumento del espesor implica un aumento de absorción en todas las frecuencias, cuando el espesor aumenta, se observa que el aumento a bajas frecuencias se ‘compensa’ con una disminución a frecuencias superiores. Esta diferencia se observa especialmente en las muestras preparadas con colillas no disgregadas [Figura 4c)]. Si, no obstante, se calcula la absorción en todo el rango de medida (de 50 a 1600 Hz) se puede observar en la Figura 5 que, el aumento del espesor implica para todo el rango estudiado un claro aumento de la absorción global media de las muestras. Como se aprecia en esta figura, las muestras de espuma usadas muestran un comportamiento ligeramente diferente a los otros tres tipos de muestras del estudio.

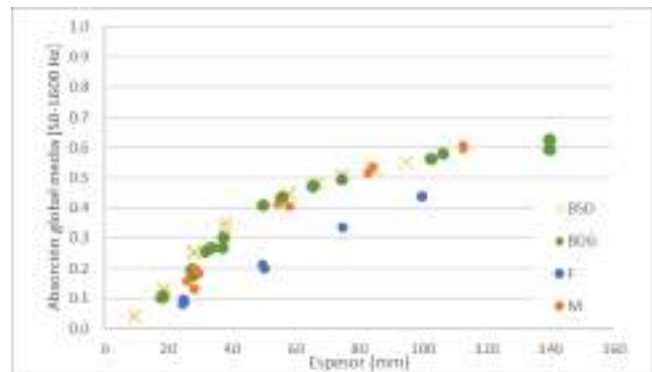


Figura 5. Variación de la absorción global media [50-1600 Hz] con la variación de espesor para los diferentes tipos de muestras estudiados.

En cuanto a los máximos de absorción, continuando en la Figura 4, se observa que, para los espesores más altos, existe un máximo de absorción del material en el rango de frecuencias medido (de 50 a 1600 Hz); sin embargo, para las muestras de menor espesor se ve que existe un continuo crecimiento de la absorción en el mencionado de frecuencias, si bien se intuye que el máximo de absorción se encuentra a frecuencias de valor superior a 1600 Hz.

Para los máximos de absorción que claramente se sitúan en el rango de frecuencias, se puede apreciar que, al aumentar el espesor, se produce un corrimiento del valor de la frecuencia del valor máximo de absorción hacia frecuencias inferiores. Este desplazamiento se analizará más adelante. También se observa que, excepto en el caso de las muestras de espumas, este descenso en el valor de la frecuencia del primer máximo va acompañado de un ligero descenso del valor máximo de la absorción de las muestras. Este comportamiento se ha representado en la Figura 6, en la que se han eliminado los valores correspondientes a aquellos espesores en los que se aprecia que el máximo de absorción tendría lugar por encima de 1600 Hz.

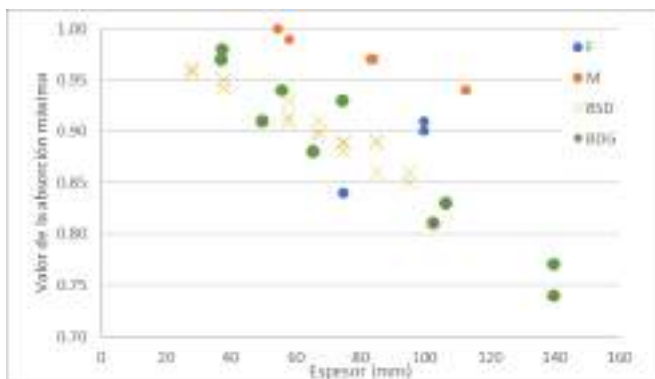


Figura 6. Variación con el espesor de la muestra de los valores del coeficiente de absorción máximo para los diferentes tipos de muestras.

Finalmente, en la Figura 4, como ya se ha mencionado, también se aprecia que el aumento del espesor provoca un desplazamiento del máximo de absorción a frecuencias más bajas. Este comportamiento, como ya se indicó en el apartado de introducción, es esperado, al irse incluyendo en el interior del material, cuando aumenta el espesor, máximos de velocidad de frecuencias inferiores. En la Figura 7, se muestra el corrimiento en el valor de la frecuencia del máximo de absorción en las muestras preparadas para los diferentes tipos de muestras y, adicionalmente, se incluye, en forma de línea continua, la expresión teórica indicada en la Ec. 1, suponiendo una temperatura de 18 °C.

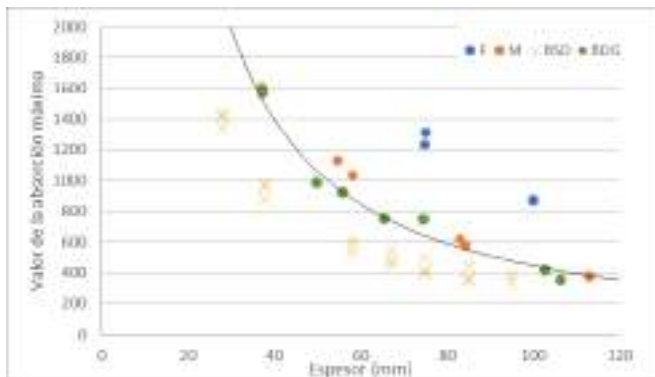


Figura 7. Variación del valor de la frecuencia de absorción máxima con el espesor de la muestra para los diferentes tipos de muestras. La línea sólida representa los valores dados por la Ec.1.

En la Figura 7, se puede observar, en primer lugar, que la tendencia descrita de que la frecuencia del máximo de absorción se desplace a frecuencias inferiores al aumentar el espesor, se aprecia en los cuatro tipos de muestras considerados para su estudio. Por otro lado, se observa que

la tendencia, si bien descendiente en todos, es muy diferente de un tipo de muestras a otro y sólo entre las muestras preparadas con colillas disgregadas y las muestras de lana mineral, podría haber algún tipo de similitud, que habría que analizar con más detenimiento. De igual forma, en el comportamiento teórico se aprecia que sólo las muestras preparadas a partir de colillas usadas disgregadas, claramente, y en menor medida, las muestras de lanas minerales tienen un comportamiento similar al que predice la ecuación teórica.

4. CONCLUSIONES

Los estudios llevados a cabo con muestras de diferentes espesores de cuatro tipos diferentes de materiales porosos muestran que:

- El incremento de espesor produce un aumento de absorción acústica, más destacado para espesores pequeños y más atenuado al aumentar el espesor.
- Asociado al aumento del espesor se produce un desplazamiento de los máximos de absorción hacia frecuencias más bajas. Este desplazamiento va acompañado, en tres de los cuatro materiales estudiados, de un descenso del valor de absorción máxima de las muestras.
- Se observa que la tendencia de disminución, al aumentar el espesor de la muestra, de los valores de las frecuencias de los máximos de absorción, es diferente de un tipo de muestras a otras y, sólo en dos de los tipos de materiales estudiados, se aprecia una cierta semejanza por la expresión teórica en la bibliografía.

Los estudios llevados a cabo y presentados en este trabajo, se podrían ampliar con estudios estadísticos que pongan de manifiesto si las similitudes indicadas o descartadas, lo son estadísticamente. Además, parece conveniente, ampliar el estudio que se presenta a muestras de 29, que nos permitirían comprobar cuál es la influencia de la absorción en el rango de frecuencias comprendido entre 500 y 6400 Hz. Por último, dada la disparidad observada entre unas muestras y otras, parece también interesante, el ampliar el estudio con nuevos tipos de materiales porosos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados se enmarcan dentro del contrato entre la Universidad de Extremadura y ALTADIS denominado “Desarrollo de la línea de investigación de reciclaje de filtros usados de cigarrillos como materiales acústicos” (ref. 075/21).

6. REFERENCIAS

- [1] J. Ramis, J. Alba, R. del Rey, E. Escuder, V. J. Sanchís. “New absorbent material acoustic based on kenaf’s fibre”, *Materiales de Construcción*, 60, 299, 133-143, 2010.
- [2] R. Maderuelo-Sanz, J.M. Barrigon Morillas, M. Martín Castizo, V. Gómez Escobar, G. Rey Gozalo. “Acoustical performance of loose cork granulates”, *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 321-330, 2014.
- [3] F. Martellotta, A. Cannavale, V. De Matteis, U. Ayr. “Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder”. *Applied Acoustics*, 141, 71–78, 2018.
- [4] J.M. Gadea Borrell, J. Juliá Sanchís, J. Segura Alcaráz, I. Montava Belda. “Sustainable sound absorbers from fruit stones waste”, *Applied Acoustics*, 161, 107174 (9pp), 2020.
- [5] M. Raj, F. Shahab, N. Tandon. “Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: A study on denim shoddy and waste jute fibers”, *Applied Acoustics*, 159, 107070, 2020.
- [6] R. Rey, A. Uris, J. Alba, P. Candelas. “Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications”, *Materials*, 10, 1277-1287, 2017
- [7] H. Kuttruf, *Room Acoustics*, Spoon Press, EEUU, 2000.
- [8] A. Carrión Isbert, *Diseño Acústico de espacios arquitectónicos*, Edicions UPC, Barcelona, 1998.
- [9] V. Gómez Escobar, C. Moreno González, G. Rey Gozalo. “Analysis of the influence of thickness and density on acoustic absorption of material made form used cigarette butts”, *Materials*, 14, 4524 (16pp), 2021.
- [10] V. Gómez Escobar, C. Moreno González, M^a J. Arévalo Caballero, M^a L. Durán Martín-Merás, G. Rey Gozalo, C. J. Pérez Sánchez. “Influencias en la absorción acústica de muestras preparadas a partir de colillas de cigarrillos usadas,” in Publicación del Congreso TecniAcústica 2022 (Elche, Spain), pp 466, 473, 2022.
- [11] ISO 10534-2. Acoustics: Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedances Tubes. Part 2: Transfer-Function Method. International Organization for Standardization, Switzerland, 1998.

IN-SITU ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF POROUS MATERIALS USING A PU-PROBE

Marco Antonio Ribera Tejada^{1}*

Paulo Amado Mendes¹

Rui Sá Ribeiro²

Pedro Teixeira Pinto²

¹ University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal, Coimbra, Portugal

² Amplitude Acoustics - Acústica e vibração Lda, Maia, Portugal

ABSTRACT

The PU probe technique allows in-situ surface impedance measurements of porous materials with minimal sample preparation and measurement setup. However, the in-situ condition comes at the cost of multiple additional factors, such as the measurement environment and probe positioning, which can influence the results if not properly addressed. In this work, a sensitivity analysis is performed for two different materials, rockwool and melamine foam, with varying densities and sample thicknesses, aiming to provide a set of guidelines on how to perform measurements with the PU probe technique regarding sample size, methodology, and probe location. This technique is then compared with the current standardized procedures by converting all measured normal incidence sound absorption data into random incidence absorption coefficients of infinite lateral dimensions. Furthermore, the acoustically absorbent materials were inversely characterized using a minimization algorithm to estimate non-acoustical macroscopic parameters from the impedance gun and impedance tube normal incidence measurements. The results from both techniques were then compared with the macroscopic parameters determined with direct methodologies.

Key Words— acoustic characterization, sound absorption, PU probe.

1. INTRODUCTION

Sound-absorbing materials play a crucial role in various applications, ranging from noise control to architectural acoustics, enabling us to enhance the sonic environment and

improve our quality of life. The growing trends of urbanization and industrial development have made effective noise mitigation strategies a necessity as the environments where we live and work become increasingly noisier. The use of porous materials constitute a common and versatile solution, capable of efficiently absorbing sound energy across a wide frequency range. Current efforts are being focused on the development of sustainable and cost-efficiency materials, while providing good acoustic features [1].

To determine the Sound Absorption Coefficient (SAC), an indicator of how much energy is dissipated into thermal energy, reverberant chamber and impedance tube methods have been commonly used. The former method often demands large sample areas, which may not be feasible for the development of new materials, particularly considering economic constraints. In contrast, using an impedance tube for measurements could offer a more viable solution. However, this approach comes with its own set of limitations, such as the normal incidence restriction and the additional sample preparation and manipulation required. Free-field methods, developed in recent years, could become a solution to address these limitations.

The intention of this work is to study the influence of some factors that come into play when performing in-situ measurements and address these limitations using a model fitting algorithm. Then, a comparison with the standardized methods is performed, subdividing the results into normal and random incidence.

* **Contact author:** marco.ribera@hotmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. ABSORPTION MEASUREMENT METHODS

The main methods regarding the measurement of the sound absorption coefficient are presented, along with their limitations. Free-field methods are further introduced.

2.1. Reverberation chamber

The reverberant chamber allows deducing a diffuse field absorption coefficient of a sample by the effect of the rate of decay of sound in a room, with and without the sample, assuming a perfectly diffuse field. It is thus commonly referred to as "Sabine's Absorption Coefficient." The international standard ISO 354:2003 [2] specifies the measurement methodology, relying on Sabine's equation to obtain the equivalent absorption area of the sample.

In practice, it is difficult to achieve a perfectly diffuse field. Different rooms with different shapes and volumes may result in high levels of uncertainty as well as large discrepancies in the absorption coefficients compared to the theoretical random incidence sound absorption coefficient [3]. Additionally, the finiteness of the measured sample results in an increased absorption when measuring with this method due to the diffraction effects from the samples' edges, often leading to SAC values above 1 [4].

Furthermore, the measurement chamber must have a volume of at least $200m^3$. Additionally, large sample areas are required, varying between 10 and $12m^2$, depending on the volume of the reverberant chamber, which often may not be feasible during the research and development of new materials. The high cost of these conditions often limits their application, leading to the use of Impedance Tube measurements instead.

2.2. Impedance Tube

The impedance tube method, also known as the Kundt tube, is widely used because only small samples are needed. Several parameters can be retrieved using, for example, the transfer-function method standardized by ISO 10534-2 [5]. Unlike the reverberant chamber method, only plane waves at a normal incidence angle are considered. Therefore, the resulting absorption coefficient is addressed as the normal incidence absorption coefficient and cannot be directly compared with the one measured in the reverberant chamber.

Despite its advantages, this method requires careful sample preparation and manipulation at multiple sample diameters, which may be challenging for certain materials, such as lower-density porous materials. Moreover, differences between the sample and the actual implementation of the material may result in differences in acoustic properties.

2.3. Free-field methods

The free-field methods originated from a generalization of the Impedance Tube method, with the aim of measuring the acoustic impedance of ground surface [6]. Different approaches have been taken, using either pressure sensors (PP), particle velocity (UU), or a combination of both (PU). The PU method, which requires the measurement of acoustic pressure and particle velocity, measures the specific impedance near the surface of the sample. In a study comparing the three above-mentioned methods, the sample size was proved to have a major impact on the measurements, producing higher errors when testing smaller samples. The PU method was found to be the most stable against sample size, as well as to source height [7].

The integration of the PU Probe into a handheld setup, often termed an "Impedance gun," has facilitated research with this device. Nevertheless, numerous factors add complexity to measurements employing this device. Valid results from this setup are expected in a frequency range from 300Hz-10000Hz. The lower boundary of this range is primarily limited by the models needed for extracting the surface impedance and signal-to-noise ratio issues encountered at the pressure and particle velocity sensors [8].

3. METHODOLOGY

3.1. Materials studied

Melamine foam and rockwool were chosen for this study due to their availability and cost-effectiveness as sound-absorbing materials. Other materials with elevated costs were excluded as the reverberant chamber method requires a significant testing area. All main non-acoustic parameters for melamine foam were previously measured through direct experimental methods [9], being the flow resistivity $\sigma = 12200 \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$, porosity $\phi = 0.98[-]$, tortuosity $\alpha_\infty = 1.01[-]$, characteristic lengths $\Lambda = 115 [\mu m]$, $\Lambda' = 115 [\mu m]$ and density $\rho = 9.6 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$. A single thickness of 50mm was available for this material.

Two thicknesses (50mm and 100mm) and two densities ($55 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ and $70 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$) were considered for rockwool, from which only a reference range of flow resistivity was available from the manufacturer. Thus, additional flow resistivity measurements were performed using the alternating airflow method, following ISO 9053 [10] on the 50mm thickness samples, obtaining $\sigma_{PN55} = 20798 \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$ and $\sigma_{PN70} = 30869 \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$. These parameters enable the modeling of both melamine and rockwool materials using the equivalent fluid models.

3.2. Simulation with equivalent fluid models

To model sound propagation in porous media and thus calculate the relevant absorption coefficient, these materials

can be modeled as equivalent fluid materials, where only the airborne wave propagates in the pores of the material. Several models have been developed through empirical and analytical approaches. The Delany-Bazley-Miki (DBM) is a well-known equivalent fluid empirical model, based on regression models and large number of Impedance Tube measurements on porous materials [11]. Assuming porosity and tortuosity near unity, this model can estimate the characteristic impedance \tilde{Z}_{ca} and complex wavenumber \tilde{k}_{ca} , respectively, at a frequency f ,

$$\tilde{Z}_{ca} = \rho_0 c_0 \left[1 + 5.50 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} - i 8.43 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right] \quad (1)$$

$$\tilde{k}_{ca} = \frac{2\pi f}{c_0} \left[1 + 7.81 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} - i 11.41 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right] \quad (2)$$

where ρ_0 and c_0 are the density and velocity of sound in air, respectively, and σ the flow resistivity. As only the flow resistivity was obtained for the rockwool samples, the DBM was used for the modeling of this material.

In the case of melamine foam, the availability of additional macroscopic parameters enables the modeling with the Johnson-Champoux-Allard (JCA) model, which is a more complex semi-analytical phenomenological model requiring the flow resistivity, open porosity, tortuosity, and viscous and thermal characteristic lengths to describe the visco-inertial and thermal effects, through the effective density and Bulk modulus [12],

$$\tilde{\rho}_e = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{i \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + \frac{4i \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (3)$$

$$\tilde{K}_e = \frac{\frac{\gamma P_0}{\phi}}{\left(\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\eta}{i \Lambda'^2 N_p \omega \rho_0} \sqrt{1 + \frac{i \Lambda'^2 N_p \omega \rho_0}{16\eta}} \right)^{-1} \right)} \quad (4)$$

where γ is the ratio of specific heats, η the dynamic viscosity of air, ω the angular frequency, N_p the Prandtl's number, and $i = \sqrt{-1}$. The characteristic impedance and complex wavenumber can then be obtained by

$$\tilde{Z}_{ca} = \sqrt{\tilde{\rho}_e \tilde{K}_e} \quad (5)$$

$$\tilde{k}_{ca} = \omega \sqrt{\frac{\tilde{\rho}_e}{\tilde{K}_e}} \quad (6)$$

The surface impedance can be analytically calculated using the Transfer Matrix Method (TMM) which for a rigidly backed material of thickness d , is

$$Z_s = -i \frac{\tilde{Z}_{ca}}{\cos(\theta_t)} \cot(\tilde{k}_{ca} \cos(\theta_t) d) \quad (7)$$

where θ_t is the transmitted or refracted angle, obtained from the Snell-Descartes law. The absorption coefficient at an incidence angle θ_i can then be computed as

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s \cos \theta_i - \rho_0 c_0}{Z_s \cos \theta_i + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (8)$$

3.3. PU-probe sensitivity analysis

This analysis aims to provide answers regarding the minimum sample size, the calculation method and the receiver position. The results of both materials studied, melamine and rockwool, were then compared. To quantify the difference between the measured absorption coefficients, α_{meas} , and the reference absorption curve from the Equivalent Fluid models, α_{ref} , the mean relative error was calculated as

$$e = \frac{1}{N_b} \sum_{k=1}^{N_b} \left| \frac{\alpha_{meas, k^{th}band} - \alpha_{ref, k^{th}band}}{\alpha_{ref, k^{th}band}} \right| \quad (9)$$

where N_b denotes the number of one third-octave bands considered. The reference absorption curve was obtained through the JCA model, for melamine, and through the DBM model, for rockwool. The same error analysis was performed on the Impedance Tube measurements for comparison.

PU-probe measurements were conducted at normal incidence, employing a tripod setup with the probe positioned 5mm away from the sample's surface. The calibration followed the free-field calibration method. The sample sizes varied, ranging from sizes larger than 1m² to as small as 200x200mm². Measurements were taken at both central and at a "confidence region" [13]. Surface impedance was determined through both the Plane Wave Method (PW) and the Mirror Source Method (MS). The specific characteristics and distinctions of these methods are not covered within the scope of this paper. More detailed information on this matter can be obtained in [8].

3.4. Inverse characterization

An inverse characterization procedure is proposed to overcome the limitation within the lower frequency range of the PU-probe measurements. The validation of this procedure will be achieved by comparing the inverse parameters obtained with the experimental values.

The inverse methodology was implemented using MATLAB's "fmincon" function within a Globalsearch optimization algorithm, solving for the global minimum of the objective function, defined here as the absolute error between the measured and the reference SAC from the equivalent fluid model,

$$F(f, h, \sigma, \phi, \alpha_\infty) = \sum_{fl}^{fu} |\alpha_{PU,Tube}(f) - \alpha_{ref}(f, h, \sigma, \phi, \alpha_\infty)|. \quad (10)$$

Two reference models already described, DBM and JCA, were implemented in the algorithm to obtain the reference SAC. Search space bounds for the flow resistivity, porosity and tortuosity were defined, covering a wide range of porous materials (Table 1).

Table 1. Search space boundaries of the optimization variables.

	$\sigma \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$	$\phi [-]$	$\alpha_\infty [-]$
Lower bound	1×10^3	0	1
Upper bound	1×10^5	1	5

The model fitting frequency range's lower and upper bounds, fl and fu , respectively, were defined from 100Hz to 5000Hz in the case of the impedance tube. For the PU Probe measurements, these limits are to be defined following the sensitivity analysis results.

3.5. Comparison between methods

By means of the proposed model fitting procedure, the retrieved characteristic impedance and complex wavenumber can be utilized to estimate the SAC in a virtual diffuse field using Paris equation [14]

$$\alpha_d = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta_i) \sin(\theta_i) \cos(\theta_i) d\theta_i \quad (11)$$

This procedure was applied to both PU Probe and Impedance Tube measurements, by applying trapezoidal numerical integration, with $\Delta\theta = \pi/1000$, being $\alpha(\theta_i)$ calculated for incidence angles from 0 to $\pi/2$. This conversion was compared to London's simplified approach [15].

To correct for the excess absorption from the reverberant chamber measurements, the measured Sabine's absorption coefficient α_s is converted into a virtual infinite sample size by applying a sample size correction, estimated by the polynomial regression approach detailed in [16].

4. RESULTS

4.1. Sensitivity analysis

Presented below is an overview of the analysis conducted on both melamine and rockwool materials. For the sake of brevity, only the results pertaining to melamine foam are displayed. Greater deviations in the form of underestimated absorption at normal incidence were found mainly below 800Hz, resulting in increasing error as the sample size decreases (Figure 1). Above this frequency, good agreement to the reference curve obtained from the JCA model was

found for all samples down to $200 \times 200 \text{mm}^2$. Smaller samples showed a more pronounced underestimation, finding agreement only above 4kHz.

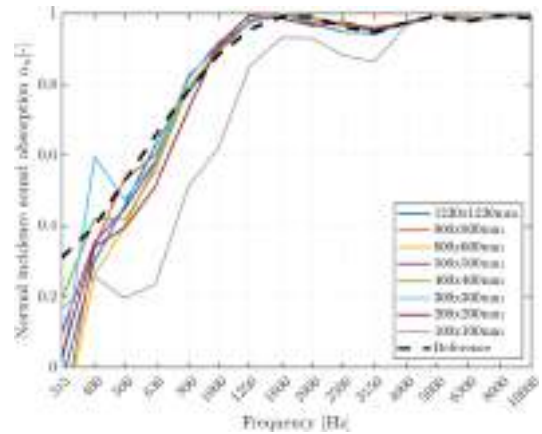


Figure 1. Sample size influence on the SAC from melamine using the PU-probe method

Figure 2 shows the calculated relative error over the working frequency range of the impedance gun. Below 800Hz, larger errors were obtained, largely surpassing those obtained by the Impedance Tube measurements. Nonetheless, independently of the sample size, from 800Hz to 10kHz the mean error from all sample sizes down to $200 \times 200 \text{mm}^2$ was of 1% for melamine foam and of 2% for rockwool using the MS model in the center position. Given these results, further measurements on the remaining materials were performed with this configuration.

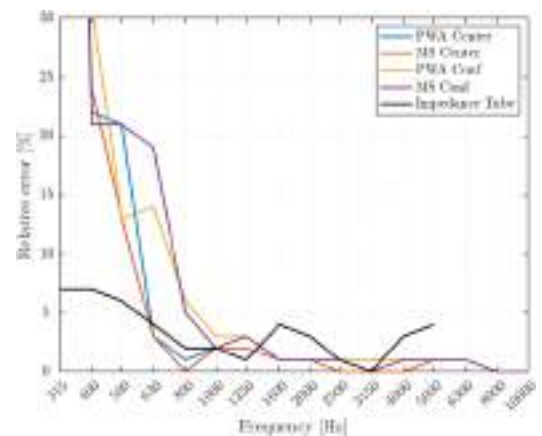


Figure 2. Relative error calculated from the JCA model for melamine foam

4.2. Inverse characterization

The parameters of the JCA model were inversely retrieved from Impedance Tube and PU Probe measurements using the proposed model fitting methodology. Following the results

from the sensitivity analysis, the model fitting range for the PU Probe measurements was set from 800 Hz -10000 Hz.

Table 2. Inverse characterization results of melamine foam

	Reference	Inverse Tube JCA	Inverse PU JCA
$\sigma \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$	12200	11221	12381
$\phi [-]$	0.98	1	0.94
$\alpha_{\infty} [-]$	1.01	1	1
$\Lambda [\mu m]$	115	114	112
$\Lambda' [\mu m]$	116	114	112

The model fitting algorithm approximated the macroscopic parameters from both the Impedance Tube and PU Probe measurements, with a good resemblance to the parameters measured through direct methodologies (Table 2 - 3).

Table 3. Inverse characterization results of rockwool

	Reference	Inverse Tube JCA	Inverse PU JCA
$\sigma_{PN55} \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$	20798	19921	18640
$\sigma_{PN70} \left[\frac{Ns}{m^4} \right]$	30869	28145	30802

4.3. Comparison between methods

Methods comparison is divided into normal and random incidence. Results are shown for samples of melamine of 50mm thick and rockwool PN55 of 100mm thick.

4.3.1. Normal incidence SAC

The measured normal incidence sound absorption curves from both Impedance Tube and PU Probe methods are presented next, alongside with the retrieved model fitted curve obtained from the PU Probe measurements.

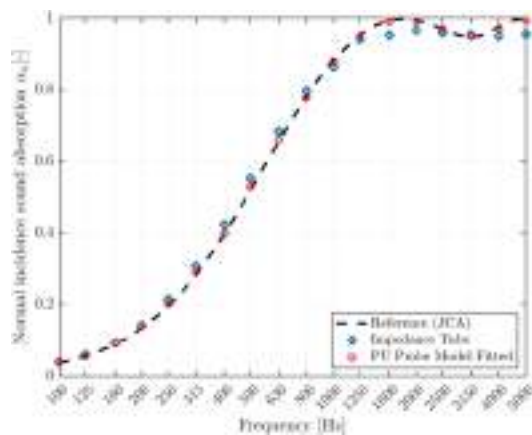


Figure 3. Normal incidence measurements of melamine, 50mm thick

Both experimental methods show a good agreement with the reference curves from the Equivalent Fluid Models, for both melamine foam (Figure 3) and rockwool (Figure 4) samples. As noted during the sensitivity analysis, below 800 Hz higher errors were found, which resulted in an underestimation of the absorption coefficient. The model fitting performed enabled to obtain comparable results down to 100 Hz from the PU Probe measurements.

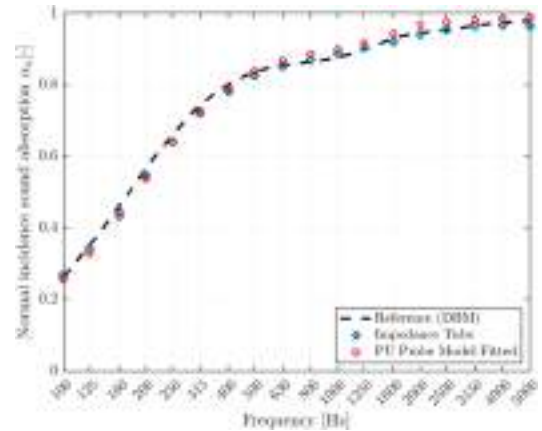


Figure 4. Normal incidence measurements of rockwool PN55, 100mm thick

4.3.2. Random incidence SAC

The model fitting methodology implementing Paris' equation enabled to obtain a broadband random incidence sound absorption curve for the PU Probe method, down to 100 Hz (Figure 5 - 6). Good agreement to the reference curve, using the reference macroscopic parameters, was found using this methodology from both Impedance Tube and PU Probe, for all materials tested. London's equation, assuming local reaction, yielded a fair approximation to the methodology proposed using Paris equation.

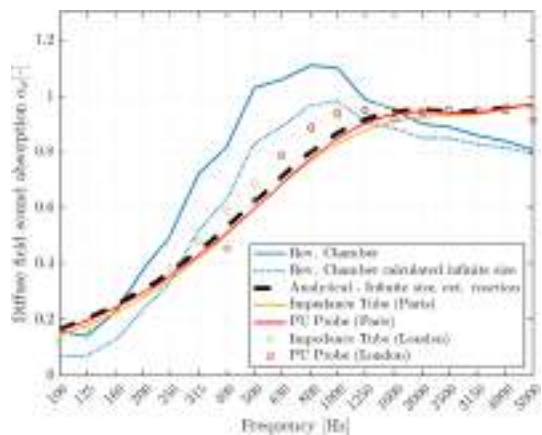


Figure 5. Comparison between all methods of melamine foam, 50mm thick

The sample size correction, calculated using the dimensions of the measured sample on the reverberant chamber, enabled the comparison to random incidence SAC from the Impedance Tube and the PU probe, as it reduced the excess absorption caused by the sample's edges. In comparison with the analytical curve, it is observed that the measured coefficients yield a similar behavior for all the materials tested, oscillating around the reference curve. The lack of diffusion found in the measurement chamber hindered the results from these measurements at higher frequencies.

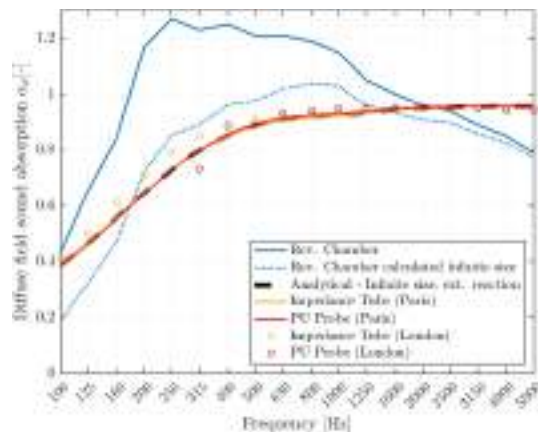


Figure 6. Comparison between all methods of rockwool PN55 100mm thick

5. CONCLUSIONS

This study highlighted the complexity and significance of various factors that come into play whenever performing in-situ measurements of sound-absorbing porous materials with a PU Probe. Below 800 Hz, the effect of sample size, sound field model and probe location proved to be significant on the measured absorption coefficient. Nonetheless, results showed to be very accurate at higher frequencies, yielding errors smaller than those obtained by the Impedance Tube, in reference to the Equivalent Fluid Models. Taking advantage of this, the model fitting procedure developed proved to be an effective solution to address the higher errors found in the low-frequency region, effectively obtaining broadband normal and random incidence SAC with samples as small as 200x200mm².

Excellent agreement was found between all measured and reference curves for both materials at normal incidence. In a diffuse field, despite the non-diffuseness found in the measurement chamber, the measured absorption after a size correction was found to be oscillating around the reference curve, from which good agreement between the Impedance Tube and the PU Probe techniques was found. The applicability of the proposed model fitting procedure should be further investigated in more complex systems, such as non-flat panels or materials with air gaps.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partly financed by FCT / MCTES through national funds (PIDDAC) under the R&D Unit Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), under reference UIDB / 04029/2020, and under the Associate Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems ARISE, under reference LA/P/0112/2020. This work was developed in the scope of the Erasmus Mundus Joint Master Degree "Waves Acoustics Vibrations Engineering and Sound - WAVES". We would like to thank to Termolan Isolamentos Termo-Acústicos S.A. for supplying the rockwool and Distrimat Materiais Técnicos, S.A. for ensuring the distribution and logistics of this material.

7. REFERENCES

- [1] N. H. Bhingare, S. Prakash, and V. S. Jatti, "A review on natural and waste material composite as acoustic material," *Polymer Testing*, vol. 80, p. 106142, 2019.
- [2] *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, ISO 354:2003(E).
- [3] W. Lauriks, A. Cops, and P. Belien, "The influence of the edge effect on the statistical absorption coefficient," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 70, no. 2, pp. 155-159, 1990.
- [4] M. Vercammen, "Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354," in *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, 2010: Melbourne, Australia, pp. 29-31.
- [5] *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method*, ISO 10534-2(E).
- [6] P. Dickinson and P. Doak, "Measurements of the normal acoustic impedance of ground surfaces," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 13, no. 3, pp. 309-322, 1970.
- [7] K. Hirose, K. Takashima, H. Nakagawa, M. Kon, A. Yamamoto, and W. Lauriks, "Comparison of three measurement techniques for the normal absorption coefficient of sound absorbing materials in the free field," *The journal of the acoustical society of America*, vol. 126, no. 6, pp. 3020-3027, 2009.
- [8] E. Tijjs, "Study and development of an in situ acoustic absorption measurement method," PhD Thesis, 2013.
- [9] M. Pereira, P. Mareze, L. Godinho, P. Amado-Mendes, and J. Ramis, "Proposal of numerical models to predict the diffuse field sound absorption of finite sized porous materials—BEM and FEM approaches," *Applied Acoustics*, vol. 180, p. 108092, 2021.
- [10] *Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance*, ISO 9053:1991(E).
- [11] Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, vol. 11, no. 1, pp. 19-24, 1990.
- [12] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of sound in porous media: Modelling Sound Absorbing Materials*. John Wiley & Sons, 2009.

- [13] E. Brandão, A. Lenzi, and J. Cordioli, "Estimation and minimization of errors caused by sample size effect in the measurement of the normal absorption coefficient of a locally reactive surface," *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 6-7, pp. 543-556, 2012.
- [14] E. Paris, "L. On the coefficient of sound-absorption measured by the reverberation method," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 5, no. 29, pp. 489-497, 1928.
- [15] A. London, "The determination of reverberant sound absorption coefficients from acoustic impedance measurements," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, no. 2, pp. 263-269, 1950.
- [16] S. Thomasson, "Theory and experiments on the sound absorption as a function of area, report TRITA_TAJ 8201," *Royal Institute of Technology, Stockholm*, 1982.

SOUND ABSORPTION PROPERTIES OF MYCELIUM BASED MATERIALS WITH TEXTILE WASTE: AN EXPLORATORY STUDY.

Luis Miguel Garcia¹
Tomas Simon Gomez^{1,2,3}
Maria del Pilar Rivera¹
Juan Camilo Oviedo¹
Christ Glorieux²
Nelson Escobar¹

¹Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de ingeniería, Medellín, Colombia

²KU Leuven, Department of Physics and Astronomy, Laboratory for Acoustics - Soft Matter and Biophysics, Heverlee, Belgium;

³University of Brescia, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Brescia, Italy

RESUMEN

Este artículo muestra un estudio exploratorio sobre la integración de residuos agroindustriales y textiles mediante un enfoque poco convencional. Mediante el cultivo de hongos dentro de una red fibrosa, actuando como aglutinante, se desarrolló un material absorbente acústico sostenible, partiendo del hongo *Pleurotus pulmonarius*, bagazo de caña de azúcar y tiras de residuos textiles sintéticos, utilizados como relleno. Los hongos se dejaron crecer en el sustrato durante 45 días y posteriormente se desactivaron y deshidrataron mediante tratamiento térmico. La absorción acústica, medida utilizando la norma ISO 10534-2, refleja la naturaleza típica de la absorción acústica porosa, caracterizada por una absorción deficiente a bajas frecuencias y un aumento gradual de la absorción con el incremento de la frecuencia. El promedio de absorción acústica (SAA) mostró una absorción energética de aproximadamente el 40% entre 200 y 2500 Hz.

ABSTRACT

This paper shows an exploratory study on the integration of agroindustrial and textile waste through an unconventional approach. By cultivating fungus within a fibrous network, acting as a binder, a sustainable sound absorptive material was developed, starting from *Pleurotus pulmonarius* fungus, sugarcane bagasse and strips of synthetic textile waste, used as fillers. Fungi were allowed to grow in the substrate for 45 days and were subsequently deactivated and dehydrated by heat treatment. The sound absorption, measured using ISO

10534-2, reflects a typical porous sound absorption nature, i.e. small at low frequencies and gradually increasing absorption with increasing frequency. The sound absorption average (SAA) was about 40% between 200 and 2500 Hz.

Key Words— *mycelium, bio-composites, sound absorption, micelio, biocompuestos, absorción del sonido*

1. INTRODUCTION

Acoustic materials play a crucial role in many fields such as architecture and noise abatement. Their sound absorption and insulation can greatly impact the overall quality of sound within a space.

In recent years, the exploration of alternative sustainable materials has gained popularity in the field [1]–[4]. Among the wide range of sustainable materials, researchers have been investigating the use of agro-industry and textile waste in combination with different types of binders.

One particular alternative that has gained recent interest, owing to its low energy requirements and upcycling potential, makes use of mycelium-based foams and composites. Mycelium, which constitutes the vegetative growth of filamentous fungi, binds organic matter through a network of hyphal micro-filaments in a natural biological process that can be harnessed for the production of various products, including acoustic absorbers, thermal insulators, and packaging systems[1].

¹ **Autor de contacto:** tomas.gomez@kuleuven.be

Copyright: ©2023 Luis Miguel Garcia et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Thanks to their high porosity and density [5], [6], mycelium-based materials prove suitable for both thermal and acoustic applications, as demonstrated by previous research [7]–[11].

Various mycelium-based materials with different types of filler have produced typical porous sound absorbers [7]–[10], which are driven by two phenomena, thermal conductivity and viscothermal losses, providing effective broadband absorption at mid-high frequencies, i.e over 500 Hz [12].

A recent examination of the state of research on acoustic applications for mycelium composites revealed a lack of comprehensive characterization despite the variety of substrates used, primarily consisting of agro-industry waste and, in one instance, paper-based waste [13]. Moreover, there is limited diversity in the fungal species employed by researchers, with the primary species being *Pleurotus Ostreatus*, *Trametes Versicolor*, and some undisclosed *Basidiomycetes* [13].

This paper presents an exploratory study in which a mycelium bio-composite was developed from sugarcane bagasse and textile waste, in combination with the fungi *pleurotus pulmonarius* sugarcane, followed by corresponding test to validate and compare its performance with previous research on mycelium based materials.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Sample preparation

Samples of the fungus species *Pleurotus Pulmonarius* were obtained from a local mycology laboratory. Additionally, sugar cane bagasse, a residue from the food industry, and textile scraps were sourced from local industries. The samples were fabricated in the city of Medellín, Colombia. It's worth noting that environmental conditions were controlled, rendering the influence of local weather variations negligible.

To prevent any potential contamination of the developed mycelium composites by microorganisms present in the substrates, a pasteurization process was employed for the sugarcane bagasse and textile scraps. Initially, an autoclave was preheated with water, brought nearly to the boiling point, and then the substrates were introduced into it. Subsequently, they were subjected to a pressure of 15 psi and 120 degrees Celcius for a duration of 45 minutes. Once the pasteurization process was completed, excess moisture in the substrates was manually removed in a sterile environment. The substrate was then placed inside trays

measuring 21 x 13 x 1.2 cm, with a composition of 70% sugarcane bagasse and 30% textile scraps by weight. These trays were subsequently inoculated with the fungal spawn, constituting 20% of the weight of the substrate, which was evenly distributed among the trays to achieve the desired density. The inoculated trays were covered with sterilized black bags and kept at a temperature of 21 degrees Celsius and a relative humidity of 50% for a duration of 45 days.

Following the cultivation stage, the material was extracted from the bags and subjected to heat in a convection oven at 65 degrees Celsius for a period of 24 hours. This step aimed to deactivate the fungi and reduce moisture while preserving the mycelium structure. Subsequently, the density of the material was measured.

2.2. Sample characterization

The bulk density of the developed material was determined through precise measurements of volume and weight. This process involved using a metric tape and a precision scale with a resolution of 0.1 g.

The sound absorption coefficient was measured following the impedance tube method, specified in ISO standard 10534–2 [14] using an inhouse developed impedance tube, with two Behringer ECM8000 model microphones. A pseudo-random sequence of plane waves consisting of periodic pink noise was generated in the tube, and the complex acoustic transfer function of the two microphone signals was determined and used to compute the normal-incidence absorption coefficient of the samples. The Audio Measurement and Analysis Software (ARTA) by Artalabs [15] was used as a signal analyzer. The reflection coefficient, characteristic impedance, and absorption coefficient were calculated, following equations (1) and (2). Based on the dimension of the test rig and the spacing between microphones the test covered a frequency range from 200 to 5000 Hz.

$$R = \frac{H_{12} - e^{jks}}{e^{jks} - H_{21}} e^{2jk(L+s)} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2)$$

Where α , and R , are the sound absorption and reflection coefficients, H_{xy} are the complex transfer function between microphones x and y , taking x as a reference; k , L , and s are the complex wavenumber, the thickness of the sample and the spacing between the two microphone respectively.

Three samples were measured and each of them was tested 3 times, for each test 100 ensemble averages were made with linear averaging. The tests were made preserving temperature and relative humidity constant, to ensure reproducibility and to dismiss possible environmental effects on the results.

3. RESULTS AND DISCUSSION

A cut sample of the resulting material for the impedance tube measurement is shown in figure 1, the resulting density of the material was 153 kg/m^3 and the thickness 1.2 cm.



Figure 1. Mycelium composite from textile strips and sugarcane bagasse.

It was observed that the developed material had a brittle nature, also, the textile strips did not adhere to the mycelium, this mainly because of their synthetic nature, whereas the sugarcane bagasse components glued together with a white matrix which was the mycelium.

The resulting sound absorption coefficient is shown in figure 2, where the average sound absorption coefficient is shown the blue line with a range of minimum and maximum values for each third octave band. It can be seen that the sound absorption increases with frequency from 250 Hz to 2000 Hz.

To make a deeper analysis of the performance of the resulting material a comparison was made with previous results shown in the literature. The results compiled by [13] were compared with the present study and are shown in figure 3, in the same fashion as in figure 2, showing the range of values reported and measured.

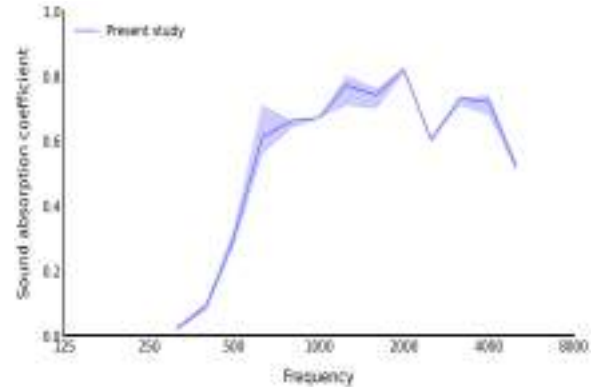


Figure 1. Sound absorption coefficient of mycelium composite from sugarcane bagasse with textile strips.

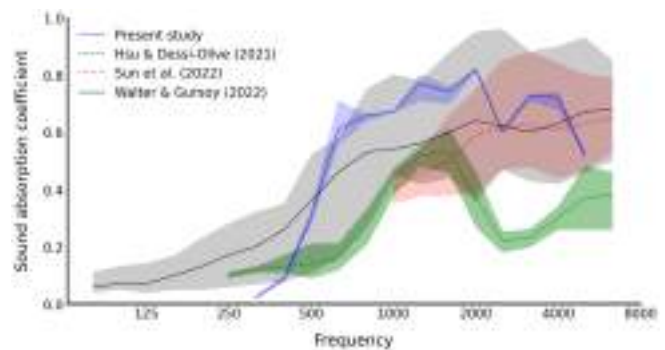


Figure 3. Sound absorption coefficient of mycelium composite from sugarcane bagasse with textile strips.

It is possible to identify that although the sample has low absorption below 500 Hz, it increases sharply, surpassing the average sound absorption reported by all previous studies. It should be noted that the thickness of the sample developed is comparable to the one reported by Sun et al. [9], but below what Hsu & Dessi-Olive [16] and Walter & Gursay [7] reported. Sun et al [9]. reports a density of 200 kg/m^3 , higher than the one showed in the developed material, Walter & Gursay [7] and Hsu & Dessi-Olive [16] do not report density therefore is not possible to make a comparison on such dimension.

Sugarcane bagasse usually has a high diameter $0.79 \pm 0.03 \text{ mm}$ [17] compared to other reported types of waste such as shredded paper, cardboard and hemp fibers [13], thus assuming that the densities are comparable, it could be inferred that the addition of textile waste in mycelium composites could potentially increase average sound absorption.

Finally the sound absorption average between 200 and 4000 was calculated and compiled in table 1, for the measured samples and reported results in literature which have a broadband characterization.

Table 1. Sound absorption average values for the reported values in literature and measured samples.

Material	Frequency range (Hz)	SAA	Source
Sugarcane bagasse – textile strip mycelium	200 - 2500	0.42	Present study
Hemp-based mycelium	250 - 2500	0.27	[16]
Paper-based mycelium	200 - 2500	0.42	[7]

From table 1, it is observed that both paper-based mycelium and the developed samples have a similar performance, however, the paper-based material has greater sound absorption coefficient at lower frequencies, whereas the one presented in this research shows better performance at higher frequencies.

4. CONCLUSIONS

A mycelium composite made of sugarcane bagasse and synthetic textile waste with a different fungal species was developed, and its sound absorption coefficient was tested and compared with previous studies.

The sound absorption behavior of this material shows a typical absorption curve for porous absorbers, nevertheless, it shows a superior average absorption than other mycelium composites present in literature, which might be caused by the inclusion of the textile waste.

This study demonstrates the potential of mycelium-based composites as effective sound absorbers, with the unique advantage of incorporating sustainable waste materials. This opens new possibilities for eco-friendly acoustic solutions, paving the way for innovative approaches in construction and environmental design.

Further investigations into the optimization of mycelium composites and their broader applications should be made in order to have a competitive sound absorber also at low frequencies.

5. REFERENCES

[1] M. Jones, A. Mautner, S. Luenco, A. Bismarck, and S. John, “Engineered mycelium composite construction materials

from fungal biorefineries: A critical review,” *Materials & Design*, vol. 187, p. 108397, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108397.

[2] R. Cottone, L. Shtrepi, V. Serra, and S. L. Pagliolico, “The Recycling and Reuse of Natural Materials: Sound Absorbing Box Patterns That Use Waste from Olive Tree Pruning,” *Acoustics*, vol. 5, no. 1, pp. 177–192, Feb. 2023, doi: 10.3390/acoustics5010011.

[3] T. S. Gomez et al., “Evaluation of Colombian Crops Fibrous Byproducts for Potential Applications in Sustainable Building Acoustics,” *Polymers*, vol. 13, no. 1, p. 101, Dec. 2020, doi: 10.3390/polym13010101.

[4] T. S. Gomez et al., “Sound absorption behavior of repurposed waste fibers: Effects of fiber size, density, and binder concentration,” *Applied Acoustics*, vol. 202, p. 109174, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.apacoust.2022.109174.

[5] G. A. Holt, G. Mcintyre, D. Flagg, E. Bayer, J. D. Wanjura, and M. G. Pelletier, “Fungal Mycelium and Cotton Plant Materials in the Manufacture of Biodegradable Molded Packaging Material: Evaluation Study of Select Blends of Cotton Byproducts,” *J Biobased Mat Bioenergy*, vol. 6, no. 4, pp. 431–439, Aug. 2012, doi: 10.1166/jbmb.2012.1241.

[6] F. V. W. Appels et al., “Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites,” *Materials & Design*, vol. 161, pp. 64–71, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.11.027.

[7] N. Walter and B. Gürsoy, “A Study on the Sound Absorption Properties of Mycelium-Based Composites Cultivated on Waste Paper-Based Substrates,” *Biomimetics*, vol. 7, no. 3, p. 100, Jul. 2022, doi: 10.3390/biomimetics7030100.

[8] C. Dognini, S. Basu, P. Piana, and E. Gobbi, “Variation Of The Acoustic Characteristics Of Mycelium-Based Biomaterials With Time,” in *Proceedings of the 29th International Congress on Sound and Vibration*, Prague, Czechia: IIAV, 2023.

[9] W. Sun, M. Tajvidi, C. Howell, and C. G. Hunt, “Insight into mycelium-lignocellulosic bio-composites: Essential factors and properties,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 161, p. 107125, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107125.

[10] S. Sivaprasad, S. K. Byju, C. Prajith, J. Shaju, and C. R. Rejeesh, “Development of a novel mycelium bio-composite material to substitute for polystyrene in packaging applications,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 5038–5044, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.622.

[11] H. Schrit, S. Vidi, and D. Pleissner, “Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 313, p. 127910, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127910.



- [12] J. P. Arenas and M. J. Crocker, "Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials," *Sound & Vibration*, vol. 44, no. 7, pp. 12–17, 2010.
- [13] T. S. Gomez, M. Rychtarikova, R. Armstrong, and E. Piana, "Acoustic Applications Of Bio-Mycelium Composites, Current Trends And Opportunities: A Systematic Literature Review," in *Proceedings of the 29th International Congress on Sound and Vibration*, Prague, Czechia: IIAV, 2023.
- [14] ISO, "10534-2: Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method."
- [15] J. Rodina, "ARTA Software."
- [16] T. Hsu and J. Dessi-Olive, "A design framework for absorption and diffusion panels with sustainable materials," in *Proceedings of the 50th International Congress and Exposition of Noise Control Engineering*, Washington D.C., USA, 2021. doi: 10.3397/IN-2021-2074.
- [17] N. P. Pérez, D. T. Pedroso, E. B. Machin, J. S. Antunes, C. E. Tuna, and J. L. Silveira, "Geometrical characteristics of sugarcane bagasse for being used as fuel in fluidized bed technologies," *Renewable Energy*, vol. 143, pp. 1210–1224, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.082.

EVALUACIÓN ACÚSTICA DE PANELES FABRICADOS CON HOJAS DE OLIVO AGLOMERADOS CON MATRIZ POLIMÉRICA.

Isaac Montava Belda^{1*}
Jorge Gabriel Segura Alcaraz¹
Ernesto Juliá Snachis¹
Jose María Gadea Borrell¹

¹Universitat Politècnica de València

RESUMEN

La agricultura genera gran cantidad de residuos que no se gestionan adecuadamente, siendo necesario encontrar nuevos valores añadidos del residuo capaces de aumentar el beneficio del agricultor y reducir el consumo de otros productos para beneficiar el medio ambiente. Uno de los principales problemas de la cuenca mediterránea es el abandono de los campos agrícolas por su escasa productividad que conlleva al crecimiento de incendios forestales. La puesta en valor de los residuos agrícolas puede ayudar a aumentar la productividad por hectárea para evitar este abandono. En este estudio se presentan los resultados de la caracterización acústica de tableros composites, realizados con hojas de olivo procedentes de la almazara como desecho agrícola en la producción del aceite, aglomerados con una matriz polimérica. Los resultados muestran valores altos de absorción acústica en determinados rangos de frecuencia y un elevado aislamiento acústico en tableros de determinadas densidades.

ABSTRACT

Agriculture produces a large amount of waste that is not properly managed, and it is necessary to find new ways of adding value to waste that can increase the farmer's profit and reduce the consumption of other products, thus benefiting the environment. One of the main problems in the Mediterranean area is the abandonment of agricultural land due to low productivity, which leads to an increase in forest fires. The use of agricultural residues can help to increase the productivity per hectare in order to avoid this abandonment.

This study presents the results of the acoustic characterization of composite panels made with olive leaves from olive mills as agricultural waste in oil production, agglomerated with a polymer matrix. The results show high

values of acoustic absorption in certain frequency ranges and high acoustic insulation in panels of certain densities.

Palabras Clave— hojas de olivo, paneles, propiedades acústicas.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de residuos naturales es una alternativa a los productos artificiales utilizados como absorbentes y aislantes acústicos en la construcción.

La industria de la construcción consume gran cantidad de materias primas. En la cuenca mediterránea los cultivos de olivo son muy numerosos y los restos de poda no eliminados son un problema para la prevención de incendios forestales.

Destacan trabajos de investigación a partir de residuos de fibras de cáñamo [1], cañas [2] [3], tifa [4], lana de oveja [5], fibras de kenaf [6] [7], y fibras de piña [8], entre otros.

La poda del olivo que no se quema o extiende en los terrenos se utiliza en la producción de energía [9], como la biomasa [10][11], carbón activado [12] y pellets[13]. Los restos de hojas de olivo tras los procesos de fabricación del aceite de oliva en las almazaras son utilizados principalmente para la alimentación animal y sustratos para cultivos. Uno de los trabajos más significativos en el aprovechamiento de los residuos de poda es el realizado por Martellotta et al. en el que se investigan los residuos de poda de olivo como absorbentes acústicos [14] [15].

Este estudio propone una solución para valorizar las hojas de olivo mediante la fabricación de tableros acústicos con matrices poliméricas. El objetivo es desarrollar un producto que pueda ser utilizado en la industria de la construcción, utilizando un recurso fácilmente renovable buscando la sostenibilidad en un sector con un alto consumo de materias primas. Los resultados muestran diferentes

* **Autor de contacto:** ismonbel@mcm.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

[Escriba aquí]

valores de absorción y aislamiento acústico en función de la densidad del panel. En determinados rangos de frecuencia los paneles propuestos alcanzan absorciones cercanas a 0.9 y proporcionan aislamientos superiores a 20dB.

2. MATERIALES

Los materiales utilizados para la fabricación de los tableros fueron hojas de olivo (*Olea europea*) y poliuretano monocomponente. Las hojas se obtuvieron de la almazara de Alcoi. Las hojas se dejaron secar 1 mes, siendo el contenido de humedad del 8%. Las medidas medias de las hojas enteras están entre 10- 15 mm de ancho y 40-50 mm de largo, siendo 0.5 mm su espesor medio. Las hojas se mezclan con poliuretano en una proporción del 10%. Las probetas para la caracterización acústica se obtienen prensando en un molde circular la misma cantidad de mezcla para distintos espesores. Mediante este procedimiento se obtienen muestras de 7 densidades.

Tabla 1. Probetas para la caracterización acústica

	Esesor	Diámetro	Peso	Densidad
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]
OP06	6	100	0.057	1210.40
OP10	10	100	0.053	683.44
OP20	20	100	0.054	348.09
OP30	30	100	0.052	224.42
OP40	40	100	0.058	187.48
OP50	50	100	0.053	143.46
OP60	60	100	0.050	108.17

La figura 1 muestra las probetas de hoja de olivo con poliuretano ordenadas de mayor a menor espesor.



Figura 1. Probetas para la caracterización acústica.

[Escriba aquí]

3. MÉTODOS

Los coeficientes de absorción y aislamiento acústicos en la gama de frecuencias de 214.5 Hz a 1716 Hz se determinan utilizando un tubo impedancia acústica con un diámetro interior de 100 mm y una distancia entre los micrófonos de 80 mm.

Para la absorción y aislamiento acústico se siguen las directrices de las normas ISO 10534-2 y ASTM E2611-09 respectivamente. Las presiones acústicas se midieron mediante dos micrófonos (G.R.A.S. modelo 40AO) utilizando una tarjeta de adquisición de datos (NI-9234). Se utiliza la DAQ Toolbox de MATLAB para controlar la entrada analógica, procesar los datos.



Figura 2. Tubo de impedancia acústica.

La absorción acústica α , en el rango de frecuencia estudiado, se obtiene a partir del coeficiente de reflexión r :

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1)$$

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_R - H_{12}} \cdot e^{2jk_0 x_1} \quad (2)$$

El aislamiento acústico (dB) se obtiene a partir de la potencia acústica transmitida W_t y la potencia acústica incidente W_i :

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad (3)$$

4. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de absorción acústica muestran que todas las probetas presentan sus máximos de absorción entre 600 y 1600 Hz. La mayor absorción se obtiene con un espesor de 30 mm y una densidad de 224.42 kg/m², con valor de 0.95 a 1128 Hz. Por otro lado, en las probetas con mayor densidad y menor espesor la absorción acústica es prácticamente nula. Esto podría deberse a que el proceso de conformación da a lugar a superficies muy poco porosas y

fibrosas donde la hoja de olivo queda totalmente cubierta por la matriz polimérica.

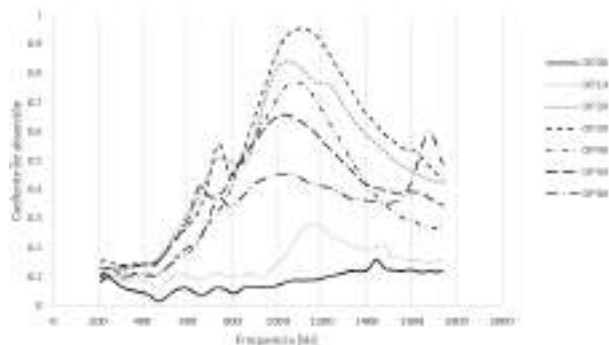


Figura 3. Absorción Acústica

En el aislamiento acústico se produce el caso contrario, los resultados muestran que las probetas con superficies menos porosas y más densas son las que mayor aislamiento acústico presentan. Los espesores de 6 y 10 mm con densidades de 1210.40 y 683.44 muestran valores de aislamiento de entre 20 y 25 dB en el rango de frecuencia de 500 a 1500 Hz.

Cabe destacar que las probetas de espesor 20 mm quedan en un punto intermedio presentando capacidades en absorción y aislamiento acústico, aunque con valores relativamente bajos.

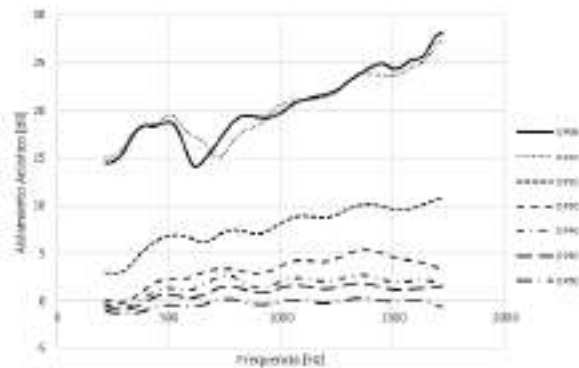


Figura 4. Transmisión acústica

5. CONCLUSIONES

La hoja de olivo es un recurso renovable y de bajo coste y su uso y reutilización reduce el consumo de energía y materias primas. Los resultados del trabajo confirman la capacidad de los paneles de hoja de olivo propuestos para el acondicionamiento acústico de salas y el aislamiento

acústico en determinados rangos de frecuencia en función de su densidad.

Para futuros trabajos, es crucial investigar la resistencia al fuego de estos materiales y considerar la posibilidad de incorporar una matriz cerámica a la estructura del panel.

12. REFERENCIAS

- [1] O. Kinnane, A. Reilly, J. Grimes, S. Pavia, and R. Walker, "Acoustic absorption of hemp-lime construction," *Constr Build Mater*, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106.
- [2] F. Asdrubali, S. Schiavoni, and K. V. Horoshenkov, "A review of sustainable materials for acoustic applications," *Building Acoustics*. 2012. doi: 10.1260/1351-010X.19.4.283.
- [3] T. Januševičius, J. Mažuolis, and D. Butkus, "Sound reduction in samples of environmentally friendly building materials and their compositions," *Applied Acoustics*, vol. 113, 2016, doi: 10.1016/j.apacoust.2016.06.014.
- [4] M. K. Moghaddam, S. Safi, S. Hassanzadeh, and S. M. Mortazavi, "Sound absorption characteristics of needle-punched sustainable Typha /polypropylene non-woven," *Journal of the Textile Institute*, vol. 107, no. 2, 2016, doi: 10.1080/00405000.2015.1016346.
- [5] R. del Rey, A. Uris, J. Alba, and P. Candelas, "Characterization of sheep wool as a sustainable material for acoustic applications," *Materials*, 2017, doi: 10.3390/ma10111277.
- [6] Z. Y. Lim, A. Putra, M. J. M. Nor, and M. Y. Yaakob, "Sound absorption performance of natural kenaf fibres," *Applied Acoustics*, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.09.012.
- [7] L. Z. Ying, A. Putra, M. J. M. Nor, and N. Muhammad, "Sound Absorption of Multilayer Natural Coir and Kenaf fibers," *23rd International Congress of Sound and Vibration*, 2016.
- [8] A. Putra, K. H. Or, M. Z. Selamat, M. J. M. Nor, M. H. Hassan, and I. Prasetyo, "Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres," *Applied Acoustics*, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.01.029.
- [9] P. Bartocci, M. D'Amico, N. Moriconi, G. Bidini, and F. Fantozzi, "Pyrolysis of olive stone for energy purposes," in *Energy Procedia*, 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.808.
- [10] D. J. Oldham, C. A. Egan, and R. D. Cookson, "Sustainable acoustic absorbers from the biomass," *Applied Acoustics*, 2011, doi: 10.1016/j.apacoust.2010.12.009.
- [11] M. B. Cunurana Cruz, "Evaluación de briquetas obtenidas a partir de residuos de Poda del olivo y Orujo de aceituna como fuente de energía alternativa," 2018.
- [12] S. M. Yakout and G. Sharaf El-Deen, "Characterization of activated carbon prepared by phosphoric

[Escriba aquí]

acid activation of olive stones,” *Arabian Journal of Chemistry*, 2016, doi: 10.1016/j.arabjc.2011.12.002.

[13] H. Fernández-Puratich, J. V. Oliver-Vilanueva, M. Valiente, S. Verdú, and N. Albert, “Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas,” *Madera y Bosques*, vol. 20, no. 3, 2014, doi: 10.21829/myb.2014.203155.

[14] F. Martellotta, A. Cannavale, V. De Matteis, and U. Ayr, “Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder,” *Applied Acoustics*, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.06.022.

[15] A. Ferrandez-Garcia, M. T. Ferrandez-Garcia, T. G. Ortuño, F. Mata-Cabrera, and M. Ferrandez-Villena, “Analysis of the Manufacturing Variables of Binderless Panels Made of Leaves of Olive Tree (*Olea europaea* L.) Pruning Waste,” *Agronomy*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/agronomy12010093.

[Escriba aquí]



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AFI-0 Acústica física. Metamateriales.

DISPOSITIVO DE FILTRADO SINTONIZABLE BASADO EN CRISTAL DE SONIDO MULTIRESONANTE

David Ramírez-Solana^{1,2*}
Jaime Galiana-Nieves³
Javier Redondo Pastor³
Rubén Picó Vila³
Agostino Marcello Mangini¹
Maria Pia Fanti¹

¹Politecnico di Bari, Bari, Italia

² Universitat Politècnica de València, Valencia, España

³ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Gandía, España

RESUMEN

El estudio de las estructuras periódicas y sus propiedades dispersivas ha llevado a la inclusión de resonancias en sus elementos, en la mayoría de los casos resonadores de Helmholtz, para analizar la interacción de ambas fenomenologías. En particular, en el caso de cristales de sonido (CS) los resonadores se incrustan en el dispersor, y es necesario considerar el diseño de estas cavidades en función de la dirección de incidencia de la onda sobre el CS. En el presente trabajo se estudia un dispersor asimétrico multiresonante en el que, bajo la incidencia de una onda plana se comporta como un dispositivo de filtrado dinámico. Este filtro se puede sintonizar en función de la rotación de los dispersores del CS.

ABSTRACT

The study of periodic structures and their dispersive properties has led to the inclusion of resonances in their elements, in most cases Helmholtz resonators to analyze the interaction of both phenomena. In particular, in the case of sound crystals (SC) the resonators are embedded in the scatterer, and it is necessary to consider the design of these cavities as a function of the direction of incidence of the wave on the SC. In the present work, a multiresonant asymmetric scatterer is studied in which, under the incidence of a plane wave it behaves as a dynamic filtering device. This filter can be tuned as a function of the rotation of the CS scatterers.

Palabras Clave— Cristal de sonido, Resonador de Helmholtz, Filtrado sintonizable, Sintonizador pasivo

* **Autor de contacto:** d.ramirezsolana@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

Los cristales de sonido (CS) son estructuras periódicas formadas por dispersores rígidos inmersos en aire. Su principal característica es que permiten el paso de fluidos y luz a través de ellos, pero no de sonido en ciertos rangos frecuenciales. Estos rangos de frecuencias en los que las ondas sonoras no se propagan se deben a las interferencias destructivas producidas por la dispersión múltiple y varían en función de la periodicidad del material, es decir la distancia entre los dispersores de la red. Estas bandas de frecuencia prohibidas se llaman Bandgaps de Bragg en inglés (Bragg-BGs) [1, 2] [3]. La frecuencia central del primer Bragg-BG es $f_{\text{Bragg}} = c/2a$, donde c es la velocidad del sonido [m/s] en el fluido (aire) y a es el parámetro de red, es decir, la distancia entre los dispersores, que determina la celda unidad del cristal [4].

Los Bragg-BGs han mejorado la capacidad de controlar la propagación de ondas a través de una gran infinidad de aplicaciones como guías de onda [5], difusores [6], barreras de sonido [7] [8] o conmutadores [9], entre muchas otras. Además de la dispersión de Bragg, debido a resonancias locales también se producen bandas de frecuencia prohibidas, en acústica, estas resonancias suelen estar generadas por Resonadores de Helmholtz (HRs) [10]. Los Bandgaps basados en las resonancias locales de los HRs (HRs-BGs) dependen de la orientación de la boca del resonador con respecto a la onda incidente y poseen un rango frecuencial reducido, por ello en la literatura existente encontramos ejemplos de dispersores multiresonantes con varios HRs [11]. La interacción entre ambos Bandgaps, Bragg-BGs y HRs-

BGs puede producir una interacción constructiva de estas dos fenomenologías y aumentar así el aislamiento acústico producido por estructuras basadas en CS [12]. En este trabajo se estudia la posibilidad de sintonizar los Bandgaps en función del ángulo de incidencia sobre el CS multiresonante dando lugar a un dispositivo capaz de filtrar ciertas frecuencias, dejando otras pasar a través del mismo, y variar este filtrado rotando todos sus dispersores. En la literatura encontramos ejemplos de dispersores asimétricos en cristales fonónicos (cuyo medio huésped es el agua) donde explorando diferentes ángulos independientes para cada dispersor de la estructura periódica se pueden obtener múltiples aplicaciones con un mismo dispositivo [13].

2. METODOLOGÍA

Consideramos un CS bidimensional, que consiste en un conjunto de dispersores con HRs, distribuidos en una red cuadrada periódica infinita. La figura 1a) muestra la celda unidad del sistema periódico bidimensional, que está definida por un dispersor con radio exterior R y dos aperturas que conforman HRs de diferentes frecuencias. Las condiciones de contorno periódicas se establecen en los contornos X e Y de modo que el CS de extensión infinita se define por una estructura periódica con red cuadrada constante con parámetro de red (a) y la celda unidad de la zona irreducible de Brillouin en el espacio recíproco. Los resonadores del dispersor se caracterizan por la longitud del cuello (L), siendo ésta también el espesor y resta de radios (externo e interno), el ancho de la boca (w), el área de superficie interna (S) y R es el radio externo. La primera frecuencia de resonancia del resonador es [10]:

$$f_{HR} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{w}{(L+\Delta\frac{w}{2})S}}, \quad (1)$$

donde Δ es el factor de corrección para la longitud efectiva del cuello que explica los efectos de la unión cuello-cavidad causada por un cambio repentino en las secciones transversales circulares (generalmente entre 1.6 y 1.8). En este trabajo no se tienen en cuenta las pérdidas termoviscosas en el medio ya que la geometría de los resonadores para todas las simulaciones lo permite (ver Apéndice A en ref [12]). La estructura de bandas se calcula para todas las direcciones de propagación en la celda unidad (ΓX , XM , MX' , $X'\Gamma$) debido al diseño asimétrico del dispersor multiresonante. Se realizan simulaciones numéricas siguiendo los modelos descritos para evaluar la transmisión de dos configuraciones con un diseño basado en la celda unitaria definida en 1a). Se considera que las condiciones de contorno periódicas (PBC) reproducen un CS infinito en la dirección Y , pero truncado a tres filas de dispersores en la dirección X (ver Fig. 1b y 1c).

En los dos modelos de transmisión, tanto la distancia entre los dispersores como la dimensión transversal de los modelos

es $a = 0.24$ m. Por lo tanto, el modelo geométrico de los CS y la celda unitaria tienen la misma topología, es decir, una estructura de red cuadrada periódica bidimensional. Una onda plana incidente con frecuencia f y presión acústica P_i se propaga a lo largo del eje X de izquierda a derecha de tal manera que está alineada con la boca del HR de mayor frecuencia en la Fig. 1b y con la boca del HR de menor frecuencia en la Fig. 1c (en adelante, alineaciones 0° (ΓX) y 90° ($X'\Gamma$)). Las capas perfectamente ajustadas (PML) se colocan en los extremos del eje X de los modelos para absorber las ondas que se propagan hacia fuera del dominio.

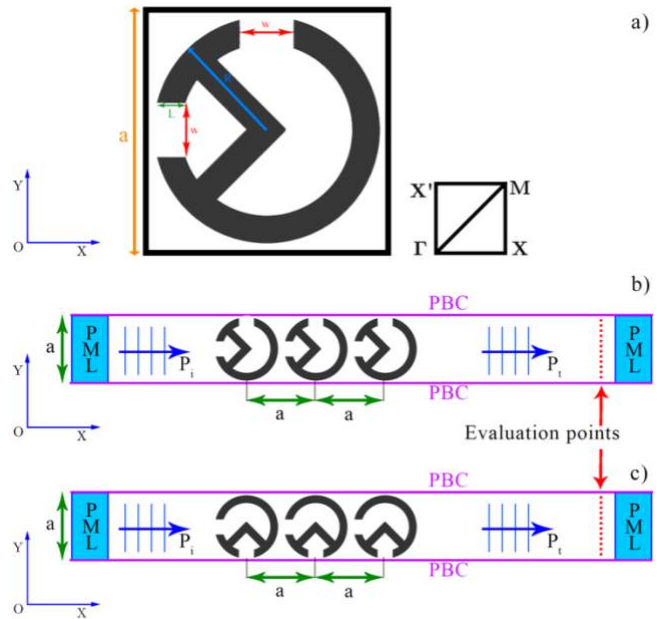


Figura 1. a) Celda unidad del dispersor multiresonante bidimensional que conforma el sistema periódico definiendo el CS y la zona irreducible de Brillouin del CS de red cuadrada basado en la teoría de Bloch-Floquet para el cálculo de la estructura de bandas. Modelos numéricos de la estructura de 3 filas de dispersores para la evaluación del coeficiente de transmisión con b) 0° (ΓX) y c) 90° ($X'\Gamma$).

La transmisión del sistema se analiza en los puntos de evaluación (Evaluation points en Fig 1b y 1c) colocados en una línea a una distancia de 1 metro del CS evaluando el coeficiente de transmisión (τ) definido por:

$$\tau = \frac{\langle P_t^2 \rangle}{\langle P_i^2 \rangle}, \quad (2)$$

donde $\langle \rangle$ representa el promedio de todos los puntos de evaluación, P_i es la presión acústica incidente al cuadrado y P_t es la presión acústica transmitida al cuadrado en los puntos de evaluación.

El valor relativo de las resonancias locales de los HRs (f_{HR}) con respecto a la frecuencia central del Bragg-BG (f_{Bragg}) es

un factor importante ya que determina la interacción entre ambos BGs. El uso de HRs en los CS no necesariamente reduce la transmisión a través del cristal. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a la alineación de las bocas y las frecuencias fundamentales de los HRs que se incorporan en los dispersores. La figura 1a muestra un dispersor que consta de dos HR alineados a 0° y 90° , con superficies acopladas. La frecuencia central del Bragg-BG es $f_{\text{Bragg}} = 700$ Hz y las frecuencias fundamentales de los HRs satisfacen que la de cavidad de mayor tamaño (90°) sea $f_{\text{HR}} < f_{\text{Bragg}} = 380$ Hz y la de cavidad menor tamaño (0°) sea $f_{\text{HR}} > f_{\text{Bragg}} = 900$ Hz. Ambos HRs tienen bocas idénticas con tamaño $w = 4,4$ cm. y longitud $L = 2,5$ cm. Para más detalles sobre la elección del diseño del dispersor acudir a referencia [12].

3. RESULTADOS

A partir de los modelos numéricos explicados en la sección anterior se presentan los resultados de las simulaciones, obteniendo la transmisión de una onda plana incidente y el cálculo de la estructura de bandas. El propósito es analizar los BGs que se producen a orientaciones opuestas y como se complementan en frecuencia para los casos bajo estudio. El valor de la frecuencia central de los HRs-BGs influye en la anchura y el nivel de transmisión del Bragg-BG. Como resultado de la interacción entre el Bragg-BG y los HRs-BGs, el aumento de la transmisión depende en gran medida de la alineación de la boca de los resonadores, ya que el parámetro de red se mantiene constante en ambos casos.

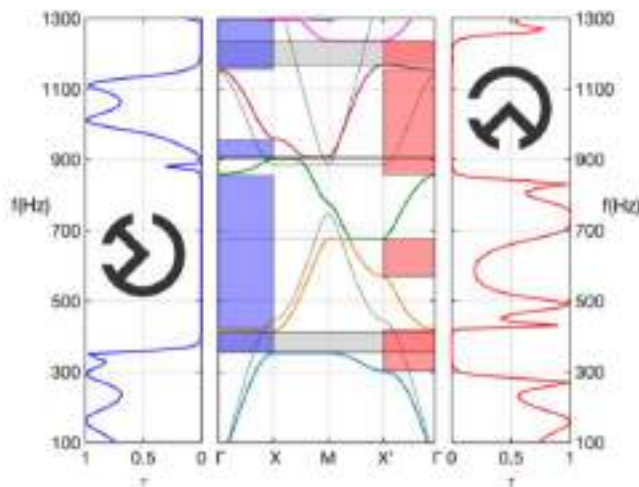


Figura 2. Coeficiente de transmisión (τ) del dispositivo y estructura de bandas del correspondiente CS de la propagación ΓX (azul) y $X'\Gamma$ (rojo). La línea negra discontinua corresponde a la estructura de bandas de un CS de dispersores rígidos sin resonador

En la estructura de bandas en color gris se representan los BGs totales para todas las direcciones de propagación (ΓX ,

$X'M$, MX' , $X'\Gamma$), en azul los BGs parciales para 0° (ΓX) y en rojo los BGs para 90° ($X'\Gamma$).

En línea negra discontinua se muestra la estructura de bandas de un CS de dispersores rígidos sin resonador, de radio igual al radio exterior de los dispersores multiresonantes bajo estudio [12].

La figura 3 muestra el comportamiento del CS multiresonante y la influencia de la rotación de los dispersores. Se muestra el coeficiente de transmisión en escala de color para el CS de dispersores con HRs acoplados en función del ángulo de rotación θ de todos los dispersores del CS, con el mismo modelo numérico que en la Fig. 1b y la Fig. 1c. El cambio en el comportamiento de la transmisión del CS es debido a cambios en la incidencia sobre las superficies de los HRs y se observa una simetría con respecto al eje X al girar hacia izquierda o derecha los dispersores.

Por lo tanto, con orientación de 0° (ΓX) se aprecia que $\tau = 0$ y no hay transmisión en el rango frecuencial del Bragg-BG (400-850 Hz). Sin embargo, conforme van rotando los dispersores se observa un aumento de la transmisión en el ese rango frecuencial. Cuando el ángulo se aumenta hasta 90° ($X'\Gamma$), la transmisión en Bragg-BG aumenta drásticamente y solo se observan mínimos de transmisión en las resonancias de los respectivos HRs. Los HRs varían su frecuencia central de resonancia (f_{HR}) dependiendo de la orientación de las bocas. Esta variación favorece la reducción de la transmisión de la estructura cuando las frecuencias de los HRs están correctamente ajustadas con respecto a la f_{Bragg} para cada alineación.

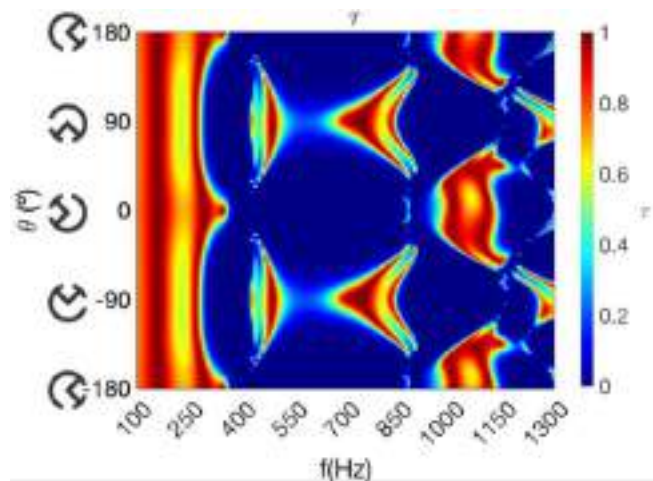


Figura 3. Coeficiente de transmisión (τ) frente a la frecuencia (eje X) y ángulo de rotación (θ) de todos los dispersores del CS (eje Y).

En la figura 3 también se puede observar cómo los BGs (color azul) tanto de Bragg como de los HRs se encuentran en rangos frecuenciales diferentes en función del ángulo mostrando una cierta similitud con un tablero de ajedrez. Este patrón en la transmisión favorece la aplicación de un

dispositivo de filtrado sintonizable que para una misma frecuencia permite que la onda se transmita o no.

A fin de representar la aplicación del CS multiresonante como dispositivo de filtrado sintonizable, se toman dos frecuencias portadoras diferentes, $f_1 = 720$ Hz y $f_2 = 1010$ Hz, en las que la transmisión es completamente opuesta para los casos estudiados de 0° (ΓX) y 90° ($X'\Gamma$). La señal moduladora utilizada es una sinusoidal de frecuencia muy baja, $f_m = 50$ Hz, para la cual el CS presenta una gran permeabilidad.

En la figura 4 se observa el coeficiente de transmisión (τ) representado en función de la frecuencia para los casos ΓX , azul y $X'\Gamma$, rojo, marcando las frecuencias portadoras seleccionadas (f_1 y f_2).

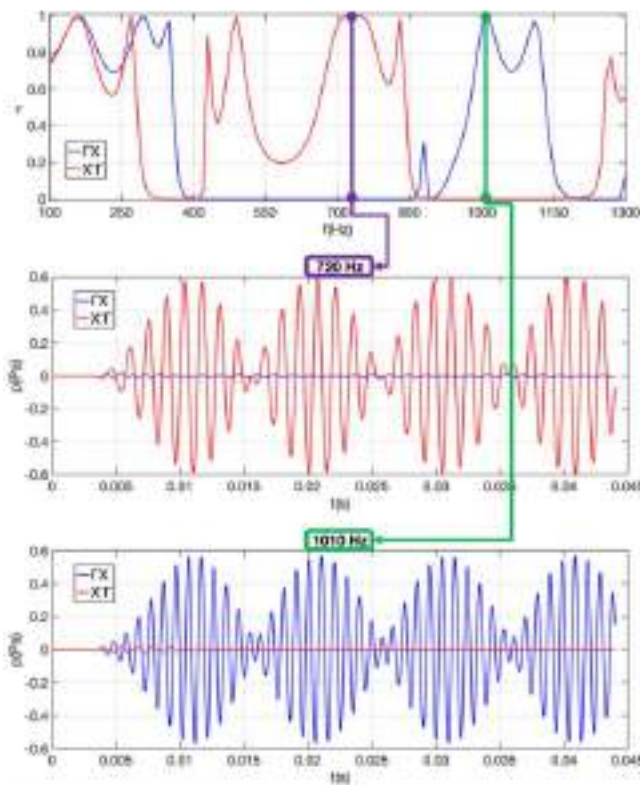


Figura 4. arriba) Coeficiente de transmisión (τ) para las direcciones de propagación ΓX (azul) y $X'\Gamma$ (rojo). Centro y abajo) presión acústica en función del tiempo de señales moduladas con frecuencia moduladora de 50 Hz y frecuencias portadoras de 720 Hz y 1010 Hz respectivamente.

En la figura 4, en la fila superior se aprecia también para el caso ΓX (azul) el Bragg-BG en el rango frecuencial 400-850 Hz donde la transmisión es nula ($\tau = 0$), pero no en todo ese rango frecuencial se encuentra el valor de $\tau = 1$ para el caso $X'\Gamma$ (rojo). De igual manera, para el caso $X'\Gamma$ (rojo) el rango frecuencial 850-1200 Hz presenta una transmisión nula, pero

con la configuración ΓX (azul) son solo algunas frecuencias las que tienen transmisión total ($\tau = 1$). La elección de frecuencias moduladoras citada anteriormente se realizó por el hecho de que eran exactamente opuestas en sus valores de coeficiente de transmisión.

En la fila central de la figura 4 para la configuración ΓX a $f_1 = 720$ Hz el CS no permite la transmisión de la señal mientras que para $X'\Gamma$, en la misma frecuencia la señal se propaga con muy poca atenuación.

En la fila inferior de la figura 4, para $f_2 = 1010$ Hz, el comportamiento es el contrario; la configuración ΓX es aquella que permite la transmisión de la señal modulada mientras que para $X'\Gamma$ la señal se propaga con una amplitud prácticamente nula. De esta manera, si tenemos ambas señales simultáneamente, se puede elegir filtrar una de ellas mediante la orientación adecuada de los dispersores.

Tabla 1. Coeficiente de transmisión (τ) para las frecuencias portadoras $f_1 = 720$ Hz y $f_2 = 1010$ Hz.

Frecuencia [Hz]	τ (ΓX)	τ ($X'\Gamma$)
720	0	1
1010	1	0

En la Tabla 1 se ilustra más claramente esta elección en relación con la transmisión para f_1 y f_2 , teniendo éstas valores diametralmente opuestos de transmisión (τ): 0 y 1.

4. CONCLUSIONES

El estudio presenta un CS multiresonante con dispersores que incorporan dos HRs, sintonizados debidamente para que el de menor frecuencia tenga $f_{HR} < f_{Bragg}$ y el de frecuencia más alta satisfaga $f_{HR} > f_{Bragg}$. Se analiza la propagación de la estructura periódica, variando la orientación de todos los dispersores de la misma en relación con la onda incidente. A la luz de los resultados, se observa que el CS permite la aplicación de este como un dispositivo de filtrado sintonizable en función de la rotación de sus dispersores.

Por último, como ideas para futuros trabajos se podrían maximizar los rangos frecuenciales en los que el coeficiente de transmisión es totalmente opuesto al del caso de dispersores rotados 90° , también buscar aplicaciones adicionales de estos dispersores asimétricos para focalización de ondas o redirección utilizando diferentes ángulos de rotación para cada uno de los dispersores del CS.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el ministerio Español de Economía e Innovación (MINECO), la Unión Europea FEDER (proyecto PID2019-109175GB-C22), y las ayudas de movilidad para doctorandos de la Universitat Politècnica de Valencia.

12. REFERENCIAS

- [1] E. Economou y M. Sigalas, «Elastic and acoustic wave band structure,» *Journal of sound and vibration*, vol. 158, nº 2, pp. 377-382, 1992.
- [2] M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski y B. Djafari-Rouhani, «Acoustic band structure of periodic elastic composites,» *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, nº 13, 1993.
- [3] Y. Y. Chen y Z. Ye, «Theoretical analysis of acoustic stop bands in two-dimensional periodic scattering arrays,» *Physical Review E*, vol. 64, nº 3, 2001.
- [4] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8a Ed., 2004.
- [5] T. Miyashita, «Sonic crystals and sonic wave-guides,» *Meas. Sci. technol.*, vol. 16, nº R47, 2005.
- [6] J. Redondo, R. Picó, V. Sánchez-Morcillo y W. Woszczyk, «Sound diffusers based on sonic crystals,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, p. 4412, 2013.
- [7] Sanchez-Perez, J.V.; Rubio, C.; Martinez-Sala, R.; Sanchez-Grandia, R.; Gomez, V., «Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers,» *Applied Physics Letters*, vol. 81, nº 27, pp. 5240-5242, 2002.
- [8] M. Peiró-Torres, M. Parrilla Navarro, M. Ferri, J. Bravo, J. Sánchez-Pérez y J. Redondo, «Sonic Crystals Acoustic Screens and Diffusers,» *Applied Acoustics*, vol. 148, pp. 399-408, 2019.
- [9] S. Alagoz y B. B. Alagoz, «Sonic crystal acoustic switch device,» *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 133, nº 6, 2013.
- [10] Alton Everest, F.; Pohlmann, K.C., *Master Handbook of Acoustics*, Fifth Edition, 2009.
- [11] K. Mohapatra y J. D. P., «Insertion loss of sonic crystal made with multi resonant shells,» *Applied Acoustics*, vol. 171, nº 107676, 2021.
- [12] J. Redondo, D. Ramírez-Solana and R. Picó, «Increasing the Insertion Loss of Sonic Crystal Noise Barriers with Helmholtz Resonators,» *Applied Sciences*, vol. 13, no. 6, p. 3662, 2023.
- [13] H. Heo, A. Krokhin, A. Neogi, Z. Cui, Z. Yuan, Y. Hua, J. Ju y E. Walker, «Multifunctional Acoustic Device Based on a Phononic Crystal with Independently Controlled Asymmetric Rotating Rods,» *Physical Review Applied*, vol. 19, nº 5, 2023.



IN-DUCT BROADBAND DISSIPATION USING MICRO-CAPILLARY PLATES

Teresa Bravo María^{1}*
Cédric Maury²

¹Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información “Leonardo Torres Quevedo” (ITEFI), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, Spain

²Ecole Centrale Marseille, Laboratory of Mechanics and Acoustics (LMA), Marseille, France

* *Autor de contacto:* teresa.bravo@csic.es

Copyright: ©2023 Bravo et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

ABSTRACT

Attenuation of low frequency noise constitutes a long-standing problem in the field of noise control. The use of Micro-Perforated Panels has been proved to be efficient if the primary noise source spectrum is confined in a narrow frequency band. To get rid of the limitations due to the backing cavity depth, unbacked configurations have also been considered. They are able to supply good attenuation results if the size of the hole diameters is reduced and the perforation ratio is increased. These devices are denoted Micro-Capillary Plates. These ultra-perforated membranes consist of highly porous panels made up of leaded glass, of high porosity with millions of micro-channels per centimeter square, the holes or square channel dimensions varying between $5\mu\text{m}$ and $50\mu\text{m}$. They are 1-2 millimeters thick and can be produced in various shapes using drawn tubes of fused, chemically etched fibers, working on both backed or unbacked configurations. These characteristics provide them with exceptional acoustical properties compared to other classical absorbers or MPPs. If rigidly backed by an air cavity of 24 mm, a MCP device provides a half-bandwidth absorption over 12 octaves whereas a MPP device works only over one-two octaves. Their performance will be examined in ducted propagation conditions.

Key-words— Broadband absorption, micro-capillary plates, low-frequency noise control.

1. INTRODUCTION

The problem of noise control has traditionally posed a tremendous threat to human health and living quality [1]. As typical dimension of a structure is of the order of the wavelength of the sound, for low frequency sound, conventional methods are impractical because they result in structures too bulky to handle. Traditional noise control materials present inherent weak absorption and transmission performance in the low frequency due to the limited viscous and thermal frictional dissipation between air and solid interfaces [2]. Sound absorbers need generally to be protected from the surrounding environment, by covering them with an impervious membrane, such as a plastic sheet or a layer of paint, that significantly decreases the absorption at high frequencies, which is usually highly undesirable [3]. A common solution is to use a perforated facing as a covering for the classical porous materials, which also changes the absorption characteristics. They are characterized by their flow resistivity which is a function of their perforation rate or porosity, their perforation size or flow resistivity and their perforation thickness.

Since the 1980s, a series of applications in demanding environments claimed for more effective non-fibrous absorptive materials. These included especial hygienic and cleaning conditions, high temperature, high-speed flow and

humidity. Maa [4, 5] developed the theory for Micro-Perforated Panels (MPPs), with perforations of sub-millimeters in diameter or slits in width, and they have been widely used in architectural acoustics and noise control engineering design. Applications include any place where non-fibrous sound absorptive materials are expected such as in air-flow duct [6, 7]. They can be manufactured from different materials such as cardboard, plastic or plywood, constituting an ecological and recyclable option for light and soundproof solutions. One important characteristic of MPPs is that they can be designed according to specific absorption characteristics by the proper optimization of the physical constitutive parameters, that makes them flexibly tuned absorbers.

However, despite all these applications and advantages, MPPs can be considered as Helmholtz Resonators with important attenuation values but confined in a narrow frequency band. Band absorption for typical MPP parameters cannot exceed two octaves. Several solutions have been proposed to enhance the control frequency domain, being the use of multi-layer configurations [8]. The optimal layout sequences are found by computing the resonance frequencies of the resulting acoustic system, improving the sound absorption bandwidth but at the expense of increasing of the total thickness of the sound absorber [9]. Another similar approach is to use arrangements of multiple MPPs with a multi-depth cavity with partitioned sections. It has been concluded that by increasing the number of partitions in the cavity, a wide uniform range of absorption can be attained but maxima of absorption would be dropped [10], presenting a trade-off between maximum absorption coefficient and wide-band performance.

To avoid limitations associated to the resonant frequencies of the combined MPPs arrays, some authors [11] have started to consider unbacked absorbers that can be used in aeronautics applications, where cavity space is reduced at maximum. Numerical simulations have shown that unbacked micro-perforated membranes with holes diameters down to $10\mu\text{m}$ can provide wideband absorbing and insulating devices in the low frequency range when increasing the perforation ratio [12]. However, there has been a lack of convenient and affordable method to build freestanding perforated membranes within the required specifications. Recently, they have been made of solid polymer and with holes diameters down to $10\mu\text{m}$ using photolithography [13]. Such ultra micro-perforated membranes, denoted as Micro-Capillary-Plates (MCPs), are used in bio-MEMS applications to pattern surfaces in various materials and to fabricate three-dimensional channel structures. Although current applications include their use as image intensifiers or as detectors of cosmic rays in particle physics, their properties in the field of acoustics for efficient dissipation in the low frequency range have not been studied yet. It has been suggested that they appear to be potentially

good candidates for the design of wideband sound absorbing and insulating MPPs that could meet the highly resistive impedance boundary conditions [11].

In this work, we will study the absorption, transmission and dissipative properties of MCPs for different configurations of their constitutive parameters. Predictions by analytical formulations and experimental verification of the expected results will confirm the validity of MCPs as broadband absorbers in the low frequency range. Section 2 will describe the characteristics of the MCPs samples analysed in this work, with a wide range of design parameters. Section 3 will proceed with a theory comprising two different regimens of interest for the MCPs, the continuous model and the slip-flow model. Using the slip-flow regimen, a parametric study is presented for the prediction of the acoustical dissipation properties that may be expected, for different MCP configurations. These results are confirmed in Section 4 against an experimental study carried out in a laboratory environment with different MCP load conditions. The work finishes with a summary of the main conclusions and some ideas for future research.

2. DESCRIPTION OF THE MCP SAMPLES

MCPs are structures built on a highly resistive material that are composed of many identical parallel cylindrical channels distributed uniformly over the surface. In contrast with traditional MPP devices, MCPs have micro-holes with diameter typically lower than $50 \mu\text{m}$ and a perforation ratio greater than 50 %. The typical thicknesses are similar for all configurations, varying between 1 mm to several mms. Figure 1 presents the glass capillary array that has been used in this work.

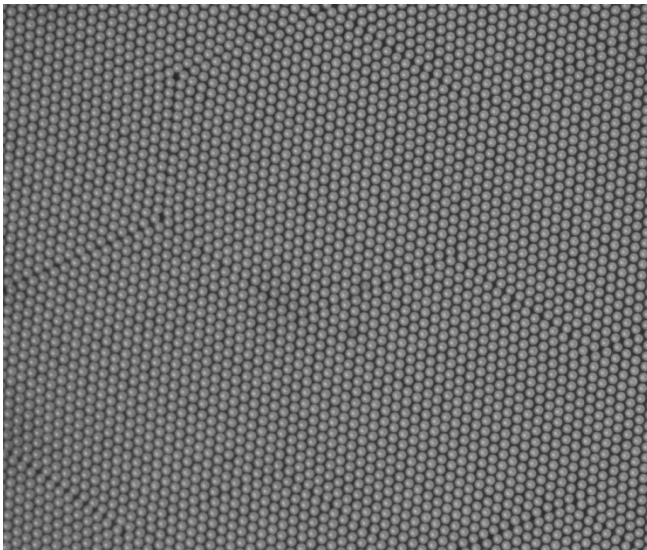


Figure 1. Photograph of the MCP sample when magnified by an electronic microscope.

The augmented image has been acquired with an electronic microscope. The characteristic parameters include the holes diameter, d , the holes pitch Λ and the panel thickness t . In case the MCP is used in a cavity-backed configuration, the thickness of the backing cavity, denoted by D , has also to be considered.

From Figure 1 we can distinguish the hexagonal-staggered hole distribution with a 60° staggering angle. The classical perforation ratio for a classical square mesh distribution computed as $\sigma = \pi d^2 / (4\Lambda^2)$ has to be recalculated for this configuration as $\sigma = \pi d^2 / (2\sqrt{3}\Lambda^2)$.

Next sections will study acoustic performance of two different MCPs compared to those of classical MPPs. The physical characteristics of the four different panel types are presented in Table 1.

Table 1. Physical parameters for two MCPs samples used in this work and those for two MPPs.

Sample type	Channel radius [μm]	Channel pitch [μm]	Perforation Ratio [%]	Thickness [mm]
MCP 1	15	32	79.71	1
MCP 2	12.5	33.5	50	0.5
MPP 1	440	2500	9.73	1
MPP 2	440	3000	6.76	1

3. ANALYTICAL FORMULATION

3.1. Slip-flow regimes

The formulation of an appropriate analytical model for acoustic characterisation of MCPs samples is presented in this section. Well-established continuous laws that have been used for analysis of microperforated partitions may not hold in this new configuration. Rarefaction effects should be considered in the field of microfluidics when characteristic lengths are of the order of $1 \mu\text{m}$ [14], as in the case of MCPs micro-channels.

A regime classification can be done in terms of the ratio between the molecular mean free path, λ , and the characteristic length L of the control volume, that is taken for MCPs as the diameter of the perforations. This quantity is called the Knudsen number and takes the expression,

$$\text{Kn} = \lambda / L . \quad (1)$$

It characterizes rarefaction effects within the micro-channels [15]. The condition $\text{Kn} \ll 1$ constitutes the requirement for thermodynamic equilibrium. In particular,

when $Kn < 10^{-3}$, the flow is in the continuum regime and classical continuity boundary conditions at the channel walls are fulfilled. On the other hand, when $10^{-3} \leq Kn \leq 10^{-1}$, the flow is in the slip-flow regime. In this regime, a velocity slip and a temperature jump are observed at the boundary wall, affecting the fluid flow and the heat transfer. When the fluid is moving in the direction parallel to the wall-fluid interface, a slip velocity $v_{slip} = v_{\Sigma}$ appears defined as the difference between the axial particle velocity, v , and the velocity at the pore wall surface v_{wall} , as indicated in Fig. 2. Typically, most of the microsystems that work with gases are in the slip flow regime.

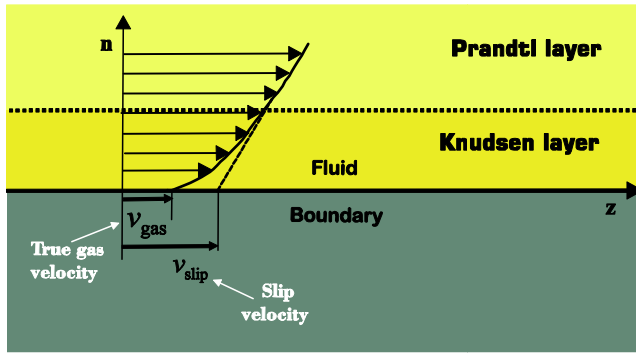


Figure 2. Knudsen layer and slip-flow regime for the MCP modelization.

Using a first-order Taylor expansion to express the equilibrium of momentum at the wall Σ , the slip velocity can be expressed as

$$v_{\Sigma} = \frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} Kn \left. \frac{\partial v}{\partial n} \right|_{\Sigma} \quad (2)$$

where σ_v is a coefficient that can be calculated from the kinetic theory of gases [16] impinging on the surface considering that for every unit of area, a fraction σ_v of the molecules is absorbed by the surface.

Assuming straight cylindrical channels in harmonic regime ($e^{j\omega t}$), linearized momentum and energy conservation lead to the viscous transfer impedance of a micro-channel, given per unit length by

$$Z_v = j\omega\rho_0 t \left\{ 1 - \frac{2}{k_v r_0} \frac{J_1(k_v r_0)}{[J_0(k_v r_0) - B_{v,k_v r_0} J_1(k_v r_0)]} \right\}^{-1} \quad (3)$$

where $k_v = \sqrt{-j\omega\rho_0/\mu}$ is the viscous diffusion wavenumber, μ the air dynamic viscosity, ρ_0 the air

density, and J_0 and J_1 are the Bessel functions of the first kind of orders 0 and 1 respectively. From Eq. (3), one can simulate the acoustic performances of MCP samples in slip-flow regime. Assuming plane wave normal incidence, the amplitude reflection and transmission coefficients are defined as $r = (Z_1 - Z_0)/(Z_1 + Z_0)$ and $\tau = 2Z_0/(Z_1 + Z_0)$ with $Z_1 = Z_v/\sigma + Z_0$, the input impedance of the absorber backed by an anechoic termination, and $Z_0 = \rho_0 c_0$. One can then calculate the dissipation, $\eta = 1 - |r|^2 - |t|^2$, as the fraction of incident energy not reflected, nor transmitted. It is expressed as a function of $\alpha = 1 - |r|^2$ (resp. $t = |t|^2$) the energetic absorption (resp. transmission) coefficients.

3.2. Parametric study

A parametric study has been carried out considering the equations implemented in the previous section for the evaluation of the performance of the proposed MCPs. The acoustic performance of both an unbacked MCP and an unbacked MPP have been compared in Figure 3 as a function of frequency showing the dissipation values and the real and imaginary parts of the specific transfer impedance.

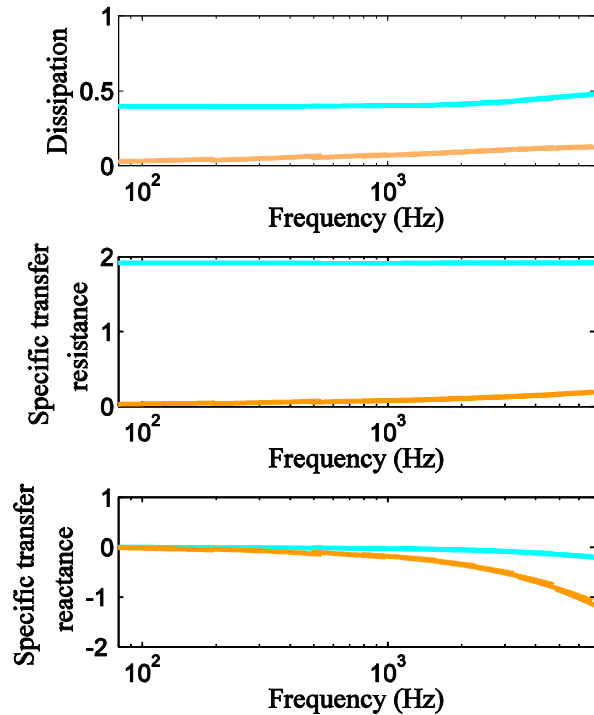


Figure 3. Normal incidence dissipation (top) and their corresponding specific input resistance (middle) and reactance (bottom) for the unbacked MCP1 (blue) and MPP1 (orange).

It can be appreciated that the dissipation values remain low for the MPP sample, whereas when the physical parameters of the MCP have been selected appropriately, the optimal dissipation value of 0.5 is achieved that extends over the whole low frequency range up to 10 kHz.

This trend can be better understood when observing the corresponding real and imaginary parts of the specific input impedance. The MPP presents a specific resistance that approaches zero in the low frequency range, but progressively increases as frequency gets higher. This is not the case for the MCP that shows a specific resistance almost constant over a broader low-frequency range. It can be stated then that the MCP acts as a pure resistance layer, with a real part that can be adjusted by a proper selection of the physical parameters and an imaginary part that remains zero over a broad band in the low frequency range.

4. EXPERIMENTAL VALIDATION

4.1. Experimental set-up

The validation of the predicted results has been carried out in a controlled semi-anechoic chamber. The acoustic performance of different samples has been estimated using a small Kundt tube, as it can be seen in Figure 4. The upper frequency is calculated considering the inner radius of the tube, $R = 1.5 \text{ cm}$, that determines the cut-off frequency of the plane wave modes and provides a maximum frequency of analysis slightly less than 6700 Hz.

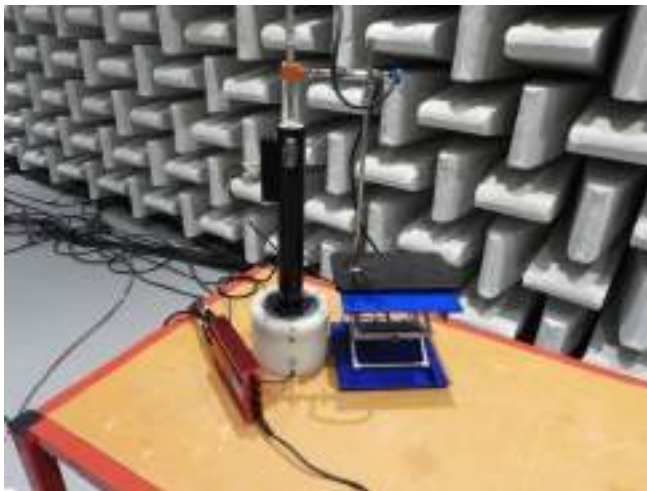


Figure 4. Photograph of the experimental set-up situated in a semi-anechoic chamber, composed of a small Kundt tube connected on one side to a loudspeaker and closed by the MCP sample.

The base of the Kundt tube is connected to a loudspeaker driven to produce a white noise between 80 Hz and 6.7 kHz, with a sampling rate of 12.8 kHz and a spectral resolution of 1.56 Hz. This noise propagates downstream the small Kundt

tube to the termination where the MCP sample is inserted, as it can be seen in Figure 5.



Figure 5. Detail of the sample holder that supports the MCP radiating in free-field conditions.

It can be appreciated that the surface occupied by the MCP sample is smaller than the cross-section area of the Kundt tube. A thick PVC adaptor was printed that provides an optimal connection between the duct and the sample.

The acquisition procedure is driven by the OROS multichannel system that generates one output to the loudspeaker amplifier and takes the inputs of the microphones situated along the duct length. We have used the two-microphone method for the determination of the sample absorption coefficient [17]. Two 1/4" condenser microphones has been situated with a separation distance between them equal to $d = 5 \text{ cm}$, providing a lower cut-on frequency of analysis equal to 200 Hz for this configuration.

A measurement of the near-field pressure and acoustic particle velocity have also been acquired simultaneously using a miniature pressure-velocity probe [18] located in the proximity of the radiating side. This allows the calculation of the load radiation impedance behind the MCP, that presents an important influence on the acoustical performance outcomes.

4.2. Dissipation performance

The predicted results will be compared with the experimental characterization in this section for the MCP1, with the physical parameters presented in Table 1. It should be noted that the predictions when considering anechoic radiation loads are underestimated in the low frequency range. To obtain a reasonable agreement, we need to take into account the load radiation impedance for the sample holder that has been predicted analytically considering the model of Silva *et al.* [19]. These results are presented with the dotted-green line in Figure 6. The same quantity has also

been estimated using the near-pressure and acoustic velocity measurements acquired with the pressure-velocity probe (solid green line). The absorption coefficients measured and estimated for the free-standing MCP sample are superimposed in Figure 6 represented in blue (solid and dotted respectively).

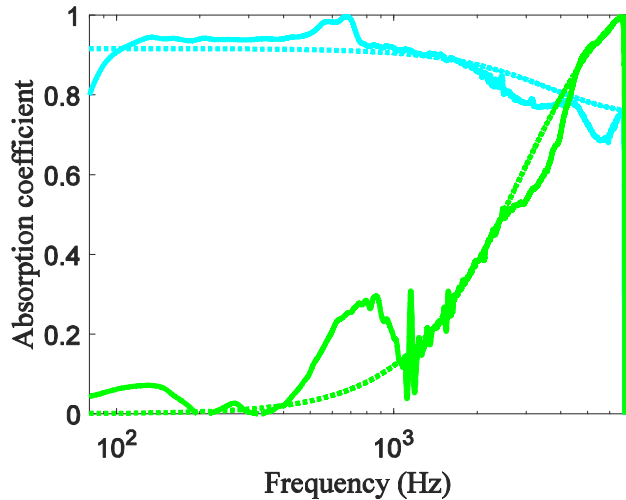


Figure 6. Normal incidence absorption coefficient for the unbacked MCP1: measured values (solid blue) and estimated analytically (dotted blue); the measured (solid green) and the predicted (dotted green) absorption of the open adaptor termination is also shown.

It can be seen that when including this correction for the radiation impedance of the MCP unbacked sample, the agreement of predictions and measurements for the absorption coefficient is good over the frequency range of analysis. We can state that the MCP achieves constant values of absorption of around 0.9 up to 1 kHz that then slowly decrease when increasing the frequency.

4.3. Comparison with classical materials

To evaluate the extent of the obtained outcomes for the proposed devices, in this section we will perform a comparison with other classical samples. To point out the influence of the physical constitutive parameters, we will first make a comparison between the MCP1 that has been analyzed in the previous section, and the MCP2 that presents a panel thickness half of the corresponding for the MCP1 (0.5 mm), and a smaller value of the perforation ratio (50%). The comparison between the predictions (dotted lines) and the measurements (solid lines) for both MCPs are presented in blue in Figure 7.

It can be appreciated that the performance of both samples is quite good in the low-frequency band, but the differences introduced on the thickness and the separation distance between holes provide an absorption coefficient that differs mostly on the behavior as a function of the

frequency. The value provided when considering an average absorption coefficient is higher for the MCP1 (light blue) that for the MCP2 (dark blue), with a similar broadband and flat performance on the low frequency range. However, it can be appreciated that the MCP2 is able to provide superior values in the very low frequency range that overtake those obtained with the MCP1. This outlines the important differences that can be obtained in the absorption performance when varying one or several parameters. In this sense, we could say that the MCP proposed in this work can be considered as acoustic metamaterials as they can be adjustable subwavelength devices that can be tuned to the required noise control objectives for each particular problem by the selection of the constitutive parameters.

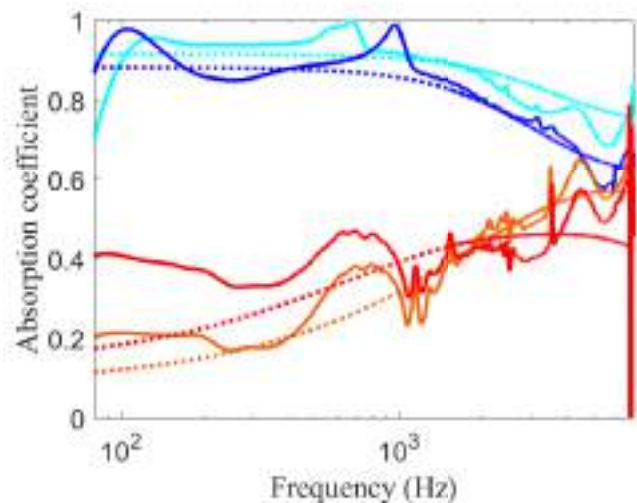


Figure 7. Normal incidence absorption coefficient for the measured (solid) and estimated analytical values (dotted) for the two unbacked MCP1 (light blue) and MCP2 (dark blue) compared to the classical MPP1 (red) and MPP2 (orange).

A comparison with other classical materials is also presented in Figure 7. In particular, we have included the absorption coefficients for two classical MPPs, with the physical characteristics outlined in Table 1. They both present a thickness of 1 mm, the same channel radius (0.44 mm) and slightly different values of the holes separation distance that provides similar perforation ratios that stays below the 10%. Although these are typical MPP parameters it should be noted that they have not been optimized for any particular purpose.

The measured absorption coefficients for MPP1 (red solid line) and MPP2 (orange solid line) have been measured in exactly the same conditions using the small Kundt tube situated in the semi-anechoic chamber. They results are presented in Figure 7 and superimposed to the analytical prediction using Maas model. As expected, the obtained performance is well-below those obtained with the MCP samples, although they maintain an almost-constant value below 1 kHz, with average absorption performance of

around 0.4 for MPP1 and 0.25 for MPP2. It should be kept in mind that the samples are working in unbacked, free-standing conditions. This explains the differences with the cavity-backed configurations where an absorption coefficient close to unity can be easily achieved at the Helmholtz resonance of the backing cavity. This outlines the importance of the proposed MCP materials as they allow to get rid of the backing cavity, that imposes heavy limitations in terms of dimensions, and maintaining optimal and broadband values in the low frequency range.

5. CONCLUSIONS

As an alternative to classical porous or fibrous materials for broadband and low-frequency noise control, this work proposes the possibilities of micro-capillary plates to act as wideband absorbers in this frequency range. The main characteristics of these devices are the dimensions of the hole diameters, of the order of the micrometers, and the high perforation ratio or porosity, overtaking the 50% for good performance.

Under these conditions, well-established continuum laws may not hold and alternative descriptions should be formulated for a prediction of the acoustic behavior of the MCPs. Due to Knudsen number values, transfer impedances for MCPs have been derived in the frame of the slip-flow regime that significantly deviates from the classical approach for very small channel radius, when characteristic lengths are of the order of 1 μm . Parametric studies have shown that due to their micrometric channels radius and high porosity, MCPs are pure resistive absorbers with constant resistance and minute reactance over a wide frequency band.

A set of experiments performed in a semi-anechoic chamber have validated that unbacked optimal MCPs can achieve absorption values greater than 0.9 up to 4 kHz under normal incidence. They constitute an alternative to other classical devices, such as MPPs, without limitations on the backing cavity size. Further research work could be directed towards the study of the acoustic performance to other plane waves incident angles and to different excitation pressure fields.

9. ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of the project TED2021-130103B-I00, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and the European Union "NextGenerationEU"/PRTR. It has also received support from the French government under the France 2030 investment plan, as part of the Initiative d'Excellence Aix-Marseille Université - A*MIDEX (AMX-19-IET-010).

12. REFERENCES

- [1] U. Ingard, *Noise Reduction Analysis*, Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, Massachusetts, 2010.
- [2] C. Zwikker and C. W. Kosten, *Sound Absorbing Materials*, Amsterdam, Elsevier Press, 1949.
- [3] T.J. Cox and P.D'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers – Theory, Design and Application*, Spon Press, London, 2004.
- [4] D. Y. Maa, "Potential of microperforated panel absorbers," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, pp. 2861–2866, 1998.
- [5] D. Y. Maa, "Microperforated-panel wideband absorbers," *Noise Control Engineering Journal*, vol. 29, pp. 77–84, 1987.
- [6] Y. Guo, S. Allam and M. Åbom, "Micro-perforated Plates for Vehicle Application", in *Proceedings of Internoise 2008*, (Shanghai, China), pp. 1918–1936, 2008.
- [7] S. Allam and M. Åbom, "A New Type of Muffler Based on Microperforated Tubes", *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 133, pp. 1–8, 2011.
- [8] T. Bravo, C. Maury and C. Pinhède, "Enhancing sound absorption and transmission through flexible multi-layer micro-perforated structures", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, no. 5, pp. 3663–3673, 2013.
- [9] N. N. Kim and J. S. Bolton, "Optimization of multi-layer microperforated systems for absorption and transmission loss", in *Proceedings of NoiseCon'14*, Advancing the Technology and Practice of Noise Control Engineering, (Florida, United States), pp. 8-10, 2014.
- [10] C. Wang and L.H. Huang, "On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers with different cavity depths", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, no. 1, 2011.
- [11] C. Maury and T. Bravo, "Wideband sound absorption and transmission through micro-capillary plates: Modelling and experimental validation", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 478, pp. 115356, 2020.
- [12] T. Bravo and C. Maury, "Assessing the broadband absorption properties of micro-capillary plates through modelling and experimental studies", *POMA*, vol. 42, pp. 040002, 2021.
- [13] Y. Zheng, W. Dai, D. Ryan and H. Wu, "Fabrication of freestanding, microperforated membranes and their applications in microfluidics," *Biomicrofluidics*, vol. 4, pp. 036504, 2010.
- [14] S. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin and M. R. King, *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*, Elsevier Ltd., Oxford, 2nd Edition, 2014.
- [15] V. F. Kozlov, A. V. Fedorov, N. D. Malmuth, Acoustic properties of rarefied gases inside pores of simple geometries, *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 3402–3412, 2005.
- [16] J. C. Maxwell, On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature, *Phil. Trans. Roy. Soc. Part I* 170, 1879.
- [17] ASTM E1050-12, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, ASTM International, West Conshohocken, U.S.A., 2012.
- [18] T. Bravo and C. Maury, "Sound attenuation and absorption by anisotropic fibrous materials: Theoretical and experimental study", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 417, pp.165–181, 2018.
- [19] F. Silva, Ph. Guillemain, J. Kergomard, B. Mallaroni, A. Norris, "Approximation formulae for the acoustic radiation impedance of a cylindrical pipe", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 322, pp. 255–263, 2009.

PHONONIC LATTICES AND TIME-VARYING PARAMETERS

Nathan Zwahlen^{1,2*}
 Javier Redondo Pastor³
 Victor Sanchez Morcillo³
 Rubén Pico Vila³

¹Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, Le Mans Université, Le Mans, France

²Universitat Politècnica de València, Gandia, Spain

³Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain

ABSTRACT

The propagation of linear and nonlinear waves (phonons) in finite 1-D lattices with different interaction potentials is numerically studied. These potentials are elastic linear potentials (the classical mass-spring system), and Coulomb-type potentials (nonlinear magnetic coupling). To excite the waves in the lattice, harmonic driving at the boundary is considered. We show the presence of different modes as higher harmonics and sub-harmonics, induced by the non-linearity of the system. The study is also focused on the influence of the time dependence of lattice parameters (mass and coupling strength) in the mode excitation. This analysis of time varying lattices is performed for a simple mass-spring system, and reveals novel features of wave phenomena characteristic of discrete systems.

Key words — Metamaterials, dispersion relation, 1-D lattice, phononic crystal, waves propagation

1. INTRODUCTION

In order to understand the behavior of periodic materials & structures, we can at first approximate the system to a 1-D lattice, and then expand to 2-D & 3-D. This paper will only deal with 1-D lattice. We are using two different models to model the lattice: the first one is the classical mass-spring system, in which the interaction potentials are linear; and the second one is a magnets chain, where the interaction potentials are non-linear (Coulomb-type). All the simulations with these models are made using a FDTD method. Mono- and diatomic cases are considered for each model. Finally, time-varying parameters on a simple mass-spring system are studied. These results can then be expanded to a more complex in the future.

* **Autor de contacto:** nathan.zwahlen70@gmail.com

Copyright: ©2023 Nathan Zwahlen et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. MASS-SPRING CHAIN

The first model we will study is the classical mass-spring chain. Two cases are considered for this: monoatomic, and diatomic chain. A monoatomic chain is a chain where each element has the same parameters. In our case, all the masses are the same and all the springs have the same stiffness. The diatomic chain is a chain with two different values for the masses, stiffness of the springs, and length of the springs. The studied chain is shown in Figure 1.

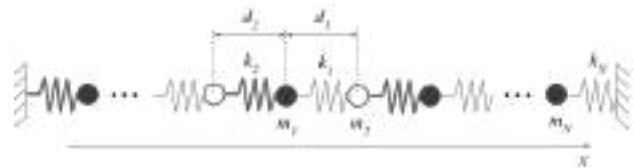


Figure 1. Layout of the studied mass-spring system.

In this figure, d_1 and d_2 are the inter-atomic distances between the atoms being at their equilibrium position x_{0n} (thus the length of the springs at rest). N is the number of atoms in the chain, m_1 and m_2 are the masses of the atoms, k_1 and k_2 are the stiffnesses of the springs. We define the relative position of the n -th atom with respect to its equilibrium position as $u_n = x_n - x_{0n}$.

2.1. Dispersion relation

To obtain the dispersion relation of the diatomic chain, we need at first to get the motion equation of both possible situations for an atom in this chain: either with mass m_1 and the spring with k_1 and d_1 parameters on its right, and the other spring on its left, or with mass m_2 and the inverted

order for the springs. Assuming the first situation happens for the n -th atom, the motion equations are expressed as such:

$$-m_1 \ddot{u}_n = k_2 u_{n-1} + (-k_1 - k_2) u_n + k_1 u_{n+1} \quad (2)$$

$$-m_2 \ddot{u}_{n+1} = k_1 u_n + (-k_1 - k_2) u_{n+1} + k_2 u_{n+2} \quad (3)$$

We can then assume the general solution for u_n :

$$u_n = A_1 \cdot \exp\left(i\left(\frac{n+1}{2}d_1 + \frac{n-1}{2}d_2\right)k_w - \omega t\right) \quad (4)$$

$$u_{n+1} = A_2 \cdot \exp\left(i\frac{n+1}{2}(d_1 + d_2)k_w - \omega t\right) \quad (5)$$

With A_1 and A_2 two amplitudes, i the imaginary unit and ω the frequency of the wave inside the chain. Then, by respectively implementing eqs. (4) and (5) in eqs. (2) and (3) we obtain the following system:

$$\begin{cases} A_1(-m_1\omega^2 + k_1 + k_2) + A_2(-k_2 e^{-id_1 k_w} - k_1 e^{id_2 k_w}) = 0 \\ A_1(-k_1 e^{-id_2 k_w} - k_2 e^{id_1 k_w}) + A_2(-m_2\omega^2 + k_1 + k_2) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Then we express this system in a matrix form as such:

$$\begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + k_1 + k_2 & -k_2 e^{-id_1 k_w} - k_1 e^{id_2 k_w} \\ -k_1 e^{-id_2 k_w} - k_2 e^{id_1 k_w} & -m_2\omega^2 + k_1 + k_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

This implies that the determinant of the first matrix is null. We can obtain ω by solving the equation for the determinant, and we finally get:

$$\omega^2 = \frac{k_1 + k_2}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{2M}\right)^2 - 2k_1 k_2 (1 - \cos((d_1 + d_2)k_w))} \quad (8)$$

$$M = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)^{-1}$$

This implies the existence of two solutions for ω , and hence the existence of two different branches for the dispersion relation as we can see of Figure 2. These two branches correspond to two different vibration behaviors: in the acoustical branch (in red on the graph), consecutive atoms in the chain move more less in phase; in the optical branch (in blue on the graph), they move more or less out of phase.

We can also see that the two branches are separated by a band gap. The width of this band gap can easily be determined by subtracting the maximum of the acoustical branch to the minimum of the optical branch, which gives:

$$\Delta\omega = \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{M} - 4\sqrt{\frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}}\right)} \quad (9)$$

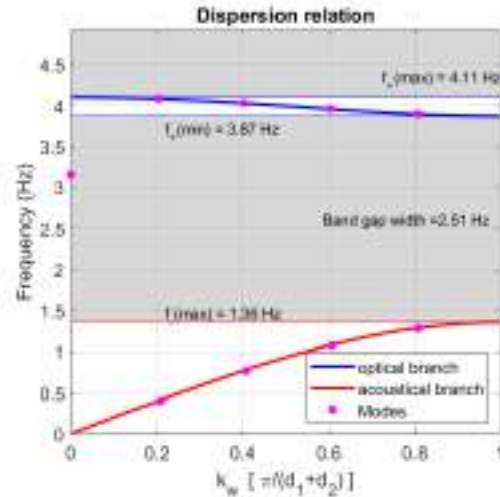


Figure 2. Dispersion relation for a chain with $N=9$, $m_1 = 0.1$, $m_2 = 0.145$, $k_1 = 3,86$, $k_2 = 29,8$, $d_1 = 0.28$, $d_2 = 0.325$.

On Figure 2, we can observe the presence of a mode in the band gap. During the solving of the eigenproblem, the eigenfrequency for this mode was determined. But since it's located in the band gap, it manifests itself as an evanescent resonance. Thus, it happens only when the chain is externally stimulated, around the excitation point.

2.2. Motion study

We are now exciting the chain with a sinusoidal force on the first atom. Results are obtained via an FDTD method. The FDTD scheme used is the following:

$$u_n(t) = 2u_n(t - \Delta t) - u_n(t - 2\Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m_n} F_D(t - \Delta t) - \frac{\Delta t^2}{m_n} k_{n-1}(u_n(t - \Delta t) - u_{n-1}(t - \Delta t)) - \frac{\Delta t^2}{m_n} k_n(u_n(t - \Delta t) + u_{n+1}(t - \Delta t)) \quad (10)$$

With the driving force $F_D = A_D \sin(\omega t)$, A_D the amplitude of the force, m_n the mass of the n -th atom, k_n the stiffness of the n -th spring, and Δt the time step for the method. Figure 3 shows the power spectral density (PSD) for the motion of each atom in the chain, with the same parameters as for Figure 1. At first, the chain is stimulated at the eigenfrequency located in the band gap. For all the atoms,

we see all the propagative modes being stimulated, and the evanescent one previously discussed is only visible around the excitation point. This allows us to see the modal distribution of the chain. The two branches are easily noticeable, as well as the band gap. Then we excite the chain at half the frequency of mode 4 to see if there is any kind of harmonics generation due to some nonlinear behavior that can stimulate this mode. We then see that some other modes are stimulated, but only because the system is discrete, implying that waves can only propagate at modal frequencies. The aimed mode (*i.e.* mode 4) isn't stimulated, we can then assume that the system doesn't generate harmonics, hence behaves mainly linearly.

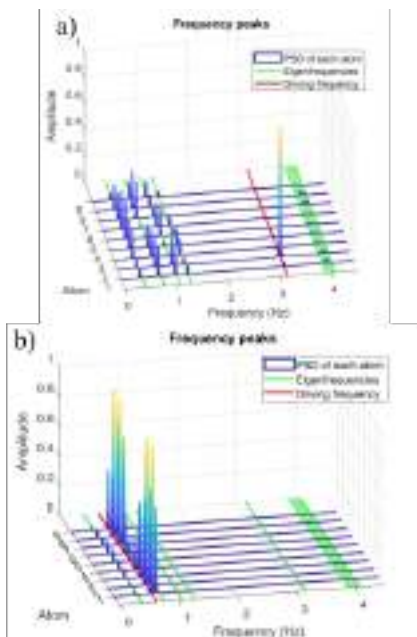


Figure 3. Normalized PSDs of the atoms with excitation on the first atom. a) with the driving frequency at the evanescent resonance. b) with the driving frequency at half of the mode 4.

3. MONOATOMIC MAGNETS CHAIN

The springs are now replaced by repulsive magnetic potentials. By doing as such, we make the interatomic potentials non-linear. This implies some changes in the behavior of the chain, as well as its layout, as shown in Figure 4. All magnets have the same mass m and are separated from a distance d at rest state. The α parameter can change depending on the particular system. For instance, $\alpha = 2$ for electrically charged particles, or $\alpha = 4$ for distant magnetic dipoles. β is the strength of the magnets.

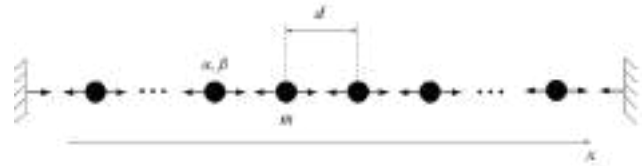


Figure 4. Monoatomic magnets lattice layout.

3.1. Dispersion relation

A good model to describe this system is provided and described in Ref. [1]. For such a system, the dispersion relation is expressed as such :

$$\omega = \omega_m \cdot \sqrt{\sin^2\left(\frac{k_w}{2}\right)}, \quad (11)$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{4\alpha\beta}{m d^{\alpha+1}}}$$

Where ω_m is the maximum frequency for propagative waves in the lattice, and k_w is again the wavenumber for the wave propagating in the chain. The chain being monoatomic, the dispersion relation only has one branch, and is pretty similar to the monoatomic mass-spring one [2]. Figure 5. shows the dispersion relation for this chain, restricted to the half period for the same reasons as for the mass-spring chain.

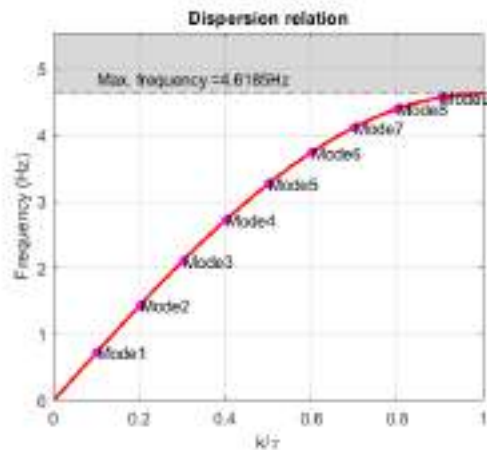


Figure 5. Dispersion relation for a magnets chain with $N = 9$, $\alpha = 4$, $\beta = 5$, $d = 1$.

3.2. Motion study

We now excite the chain in the same way as before. The FDTD scheme used for the calculations is expressed as such:

$$u_n(t) = 2u_n(t - \Delta t) - u_n(t - 2\Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} \cdot (\gamma + F_D(t - \Delta t)), \quad (12)$$

$$\gamma = \beta \cdot \left(\frac{1}{d - u_{n+1}(t - \Delta t) + u_n(t - \Delta t)^\alpha} - \frac{1}{d - u_n(t - \Delta t) + u_{n-1}(t - \Delta t)^\alpha} \right)$$

The γ term induces the non-linearities of the system, that we will observe with Figure 6., which shows the normalized PSDs of the motion of the atoms in different situations: lower or higher amplitude of excitation, and two different driving frequencies. The main phenomenon to observe here is that with a higher amplitude of excitation, the system generates more harmonics, as visible comparing Figures 6.a and 6.c. There is also a strong generation of harmonics when the driving frequency is half of an eigenfrequency, even visible at lower amplitudes of excitation.

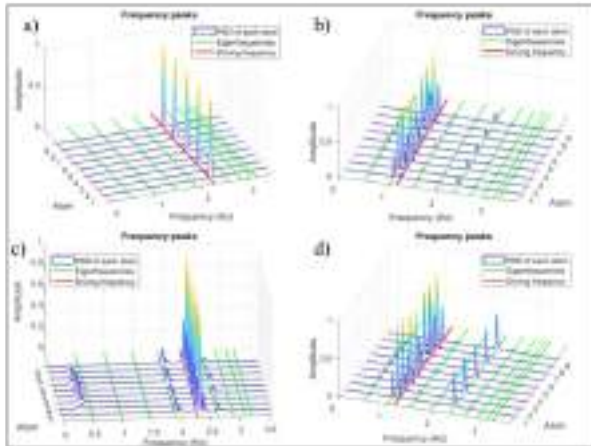


Figure 6. Normalized PSDs of the atoms with excitation at the first atom. a) low amplitude, driving frequency equal to the 5th eigenfrequency. b) low amplitude, driving frequency equal to half of the 5th eigenfrequency. c) high amplitude, driving frequency equal to the 5th eigenfrequency. d) high amplitude, driving frequency equal to half of the 5th eigenfrequency.

4. TIME-VARYING PARAMETERS

We finally study the behavior of a simple mass-spring system with time-varying mass and stiffness. The goal of this chapter is to get a first understanding of the behavior of a lattice with time-varying parameters, that could be then expanded to a full lattice (linear or non-linear). The studied system is described in Figure 7.

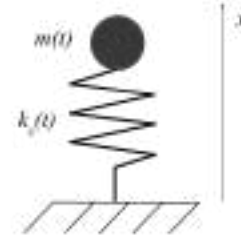


Figure 7. Mass-spring system with time-varying mass and stiffness.

The mass and stiffness are expressed as such :

$$m(t) = m_0 + A_m \sin(2\pi f_m t) \quad (13)$$

$$k(t) = k_0 + A_k \sin(2\pi f_k t) \quad (14)$$

With m_0 and k_0 the static parts, A_m and A_k the modulation amplitudes, and f_m and f_k the modulation frequencies, all respectively of the mass and the stiffness. The following equation shows the FDTD scheme used for the simulations of this system:

$$u(t) = 2u(t - \Delta t) - u(t - 2\Delta t) - \frac{\Delta t^2}{m(t - \Delta t)} [k(t - \Delta t)u(t - 2\Delta t) - F_D(t - 2\Delta t)] \quad (15)$$

With $u(t)$ the relative displacement of the mass along the x -axis with respect to its equilibrium position, and F_D the driving frequency. Figure 8 shows the PSDs of the system with and without modulations of the mass and stiffness.

The most visible phenomenon is that the higher the amplitude, the higher the number of harmonics there will be. The harmonics are centered both around the driving frequency, and the resonance frequency, and are regularly scattered, separated by the difference between these frequencies and the modulation frequency. There is also a shift of the resonant frequency for both modulations when the amplitude is higher, and the scattering of the harmonics follows this shift too. The harmonics generation for the stiffness modulation tends to be focused around the resonant frequency and less near the driving frequency, whereas the mass modulation generates harmonics around both frequencies. Another interesting phenomenon is that since the mass and stiffness are varying, the eigenfrequency is also varying in time, creating a resonance "range", as show the gray regions on Figure 8. In this range, the harmonics don't decrease as much as outside of it.

This system does possess some non-linear properties that we can find as well in the magnets chain, in a more predictable way (evenly scattered harmonics, centered about the driving and resonant frequencies,...).

obtained in this paper are only numerical, they can already give the idea of some features and behaviors of potential real systems. Results from chapter 4 could be then extrapolated to more complex lattices, such as the two lattices studied in this paper. Making a real system with time-varying masses seems to be quite complex, but modulating other parameters, such as the interactions between the elements of the chain, has already been made and shows interesting results [3].

12. REFERENCES

- [1] A. Mehrem, "Nonlinear dispersive waves in repulsive lattices," [Physical review E](#), vol. 96, no. 012208, 2017.
- [2] E. Y. Tsymlal, *Physics 927*, [Section 5: Lattice vibrations](#).
- [3] Y. Wang, "Observation of Nonreciprocal Wave Propagation in a Dynamic Phononic Lattice", [Physical review letters](#), vol 121, no. 194301 (2018).

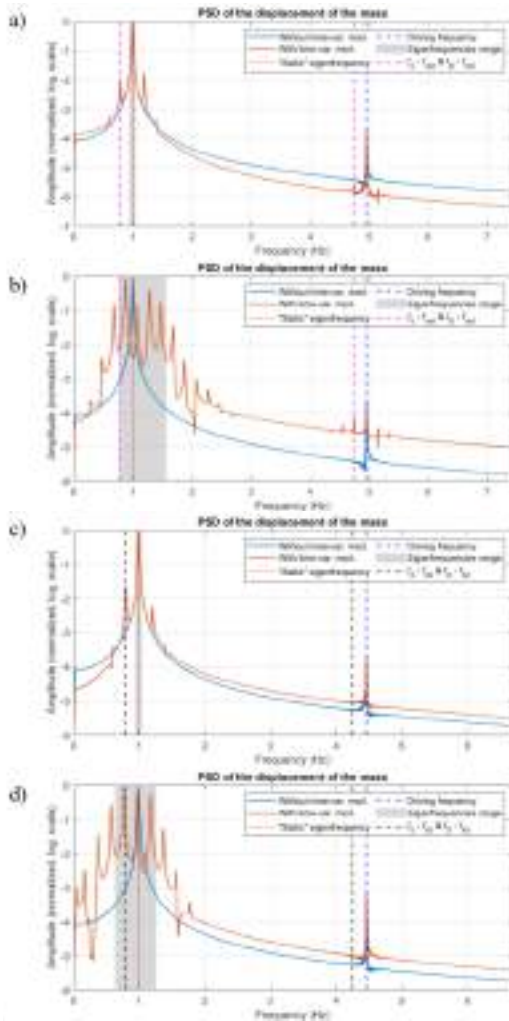


Figure 8. PSD of the motion of the atom with $m_0 = 0.1$ and $k_0 = 3.86$. a) low amplitude of modulation, mass modulation. b) high amplitude, mass modulation. c) low amplitude, stiffness modulation. d) high amplitude, stiffness modulation.

5. CONCLUSION

Two different types of 1-D discrete lattices have been studied, with different interaction potentials that imply different types of behavior. Some non-linear phenomena have been enlightened, mostly due to the excitation amplitude on the chain. Then a first glance at time-varying parameters structures has been made, by studying the motion of a simple mass-spring system with varying mass and stiffness with respect to time. Time-varying structures are complex and still to be studied. Although the results

TENDENCIAS EN EL USO DE METAMATERIALES EN ACÚSTICA APLICADA: EJEMPLOS EN ACÚSTICA DE EDIFICIOS, ACÚSTICA DE SALAS Y ELECTROACÚSTICA

Vicente Cutanda Henríquez^{1*}

¹Technical University of Denmark
Centre for Acoustic-Mechanical Micro Systems (CAMM)
Ørstedes Plads, Building 352, 2800 Kgs. Lyngby, Dinamarca

RESUMEN

Los metamateriales acústicos son estructuras que presentan propiedades y comportamientos que no se pueden realizar con materiales ordinarios. Estas propiedades se deben a la complejidad interna con la que están diseñados. En muchos casos están inspirados en metamateriales ópticos o electromagnéticos, reemplazando la luz o las ondas electromagnéticas por sonido. Los metamateriales acústicos han sido estudiados desde el punto de vista de la física teórica durante más de dos décadas y esta sigue siendo la tendencia dominante en la literatura. Las aplicaciones prácticas de los mismos están cobrando importancia, aunque en su mayoría están por desarrollar. Sin embargo, a menudo el metamaterial es desarrollado primero y luego justificado con aplicaciones ad-hoc, en lugar de motivarse por un problema acústico real. Esta comunicación presenta una selección de trabajos previos en los campos de acústica de edificios, acústica de salas y electroacústica. Estos ejemplos sirven de motivación para una discusión sobre las tendencias futuras de la acústica aplicada con metamateriales.

ABSTRACT

Acoustic metamaterials are structures that display properties and behaviors not found in ordinary materials. Such properties are the result of the internal complexity they are designed with. Very often, such designs are inspired by optical or electromagnetic metamaterial counterparts, by replacing light or other electromagnetic waves by sound. Acoustic metamaterials have been studied from the point of view of theoretical physics for more than two decades, and this approach is still dominant in the literature. Practical applications are gaining ground, but there is still a lot of work ahead in this direction. More often than not, the acoustic

metamaterial is developed first and ad hoc practical applications are proposed afterwards to justify it, rather than taking a real acoustic application as the starting point. This communication presents a selection of previous work in the fields of building acoustics, room acoustics and electroacoustics. These examples are used as the background for a discussion about the future trends in applied acoustics using metamaterials.

Palabras Clave—Metamateriales acústicos, acústica de edificios, acústica de salas, electroacústica.

1. INTRODUCCIÓN

Durante más de veinte años, los metamateriales acústicos han sido objeto de atención en la literatura científica. De forma general, nos referimos aquí a un amplio grupo de estructuras que incluyen cristales fonónicos, metamateriales basados en ondas acústicas en fluidos (aire, agua) y metamateriales donde ondas mecánicas viajan por un material sólido, así como combinaciones de todos ellos. Se trata de un campo en rápida evolución que ha venido generando una gran cantidad de publicaciones.

En esta comunicación no entraremos a clasificar y explicar los principales desarrollos en este campo, que se pueden consultar en excelentes artículos recopilatorios [1-3]. Utilizaremos algunos desarrollos, algunos realizados en la Universidad Técnica de Dinamarca, para motivar una discusión acerca del posible rumbo futuro de la ciencia y la ingeniería de los metamateriales acústicos. Estos ejemplos representan en nuestra opinión la aplicación de los metamateriales a problemas bien definidos y conocidos en ingeniería acústica.

* **Autor de contacto:** vcuhe@dtu.dk

Copyright: ©2023 Vicente Cutanda Henríquez. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. EJEMPLOS DE METAMATERIALES APLICADOS

2.1. Metamaterial para aislamiento acústico

En una serie de artículos y comunicaciones, Vázquez Torre y colegas han propuesto soluciones al problema de la transmisión de sonido a través de particiones en edificios [4,5]. Las investigaciones se originan en las bien conocidas limitaciones de los paneles usados en la construcción: 1) están sujetos a la ley de masa, que dicta un pobre aislamiento a bajas frecuencias y 2) existe un rango de frecuencias alrededor de la llamada frecuencia de coincidencia en el que el aislamiento se degrada debido a que hay un acoplamiento de las ondas acústicas y mecánicas en el aire y en el panel.

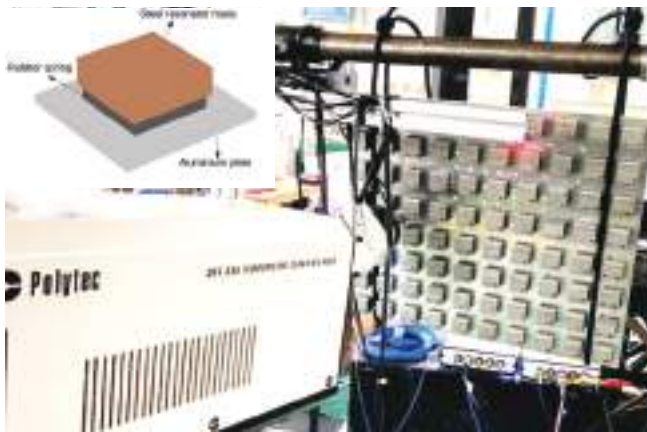


Figura 1. Un montaje experimental con un panel de aluminio incorporando resonadores mecánicos (figura insertada).

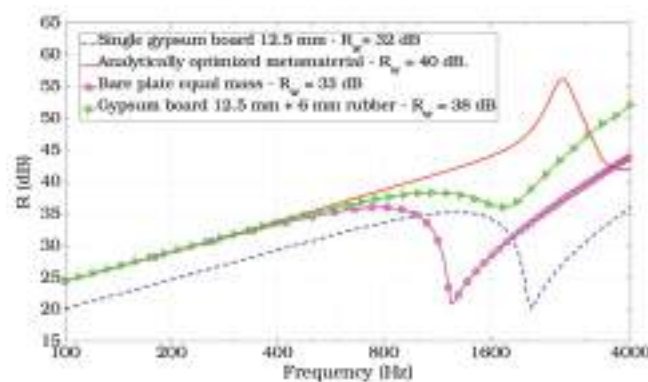


Figura 2. Pérdidas de inserción de un panel optimizado con resonadores y un panel simple de la misma masa total. La técnica convencional con goma también se muestra.

Las soluciones propuestas, especialmente para el caso de la coincidencia, emplean:

- Resonadores mecánicos unidos al panel consistentes en una masa unida mediante un elemento elástico (Fig. 1). Estos resonadores, adecuadamente

diseñados, pueden crear una banda de frecuencia en la que las ondas de flexión son atenuadas (band gap).

- Modelos híbridos numéricos y analíticos para reducir el cálculo a un tamaño y duración manejables.
- Técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos, y basadas en gradiente.
- Verificación mediante mediciones y simulaciones detalladas.

El método que parece más obvio para atacar el problema de la coincidencia puede ser adaptar el metamaterial para que produzca un band gap en la zona problemática. Sin embargo, los resultados muestran que el metamaterial reduce la transmisión a ciertas frecuencias y la aumenta en otras, por lo que no se logra fácilmente una mejora global. La solución adoptada finalmente consiste en maximizar el parámetro R_w definido en el estándar ISO 717. Este parámetro proporciona una estimación del comportamiento de un panel en un único resultado. Los resultados se pueden ver en la Fig. 2.

2.2. Metamaterial absorbente a múltiples ángulos

Una de las aplicaciones que más se utilizan para justificar y demostrar nuevos metamateriales acústicos es la absorción de ondas sonoras. Citamos como ejemplo el artículo seminal de Jiménez y colegas sobre la utilización de un conjunto de resonadores de Helmholtz convenientemente sintonizados para cubrir un ancho de banda mayor [6]. En la mayoría de los casos esta absorción se optimiza para una incidencia normal al metamaterial. La investigación llevada a cabo por Garza Agudelo y colegas estudia y propone soluciones para una situación real en acústica de salas: a menudo las ondas sonoras llegan al material absorbente a distintos ángulos, incluso rasantes, o bien el campo se puede asimilar como difuso [7,8]. Garza Agudelo parte de un metamaterial basado en resonadores de Helmholtz y coloca una estructura basada en cilindros frente al mismo (Fig. 3).

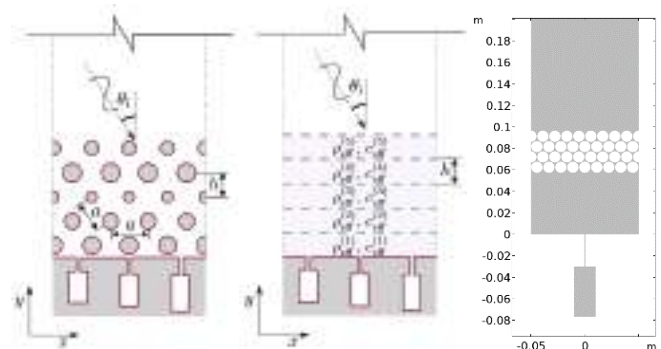


Figura 3. Metamaterial bidimensional basado en resonadores de Helmholtz con varias capas de cilindros añadidas (izquierda); versión equivalente con capas homogeneizadas (centro); Resultado optimizado para un solo tipo de resonador (derecha).

Las capas de cilindros y los resonadores se someten a un proceso de optimización para adaptarlos a un rango de frecuencias y de ángulos de incidencia definido. Para facilitar el cálculo, se utiliza un modelo basado en el método de matrices de transmisión (TMM), que es unidimensional. El resultado es validado tanto numéricamente como experimentalmente.

La estructura optimizada consiste en una capa de cilindros sobre una zona libre de ellos. Los resultados demuestran una absorción que se mantiene alta para ángulos de incidencia que casi llegan hasta la incidencia rasante (Fig. 4).

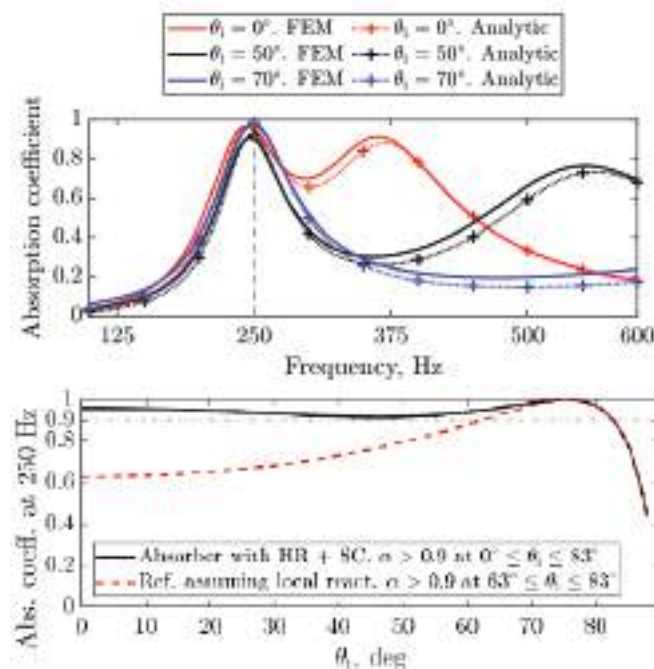


Figura 4. Comportamiento según la frecuencia (arriba) y el ángulo de incidencia (abajo) del metamaterial optimizado para un solo tipo de resonador.

La optimización se ha realizado también para un metamaterial conteniendo varios tipos de resonadores de Helmholtz, diseñados para cubrir un rango más amplio de frecuencia al estilo de la referencia [6]. Los resultados se muestran en la Fig. 5.

2.3. Metamaterial empleado en una unidad de altavoz

En esta sección describimos brevemente la aplicación de un metamaterial acústico al diseño de una unidad de altavoz por parte de Degraeve y Oclew-Brown [9]. Este diseño fue aplicado a un producto de la empresa de altavoces KEF.

La motivación surge del hecho de que las unidades de altavoz montadas en cajas radian sonido tanto al exterior como al interior. La radiación interior solamente puede ser

útil cuando se usa para reforzar las bajas frecuencias mediante una abertura o puerto. A frecuencias más altas, produce el indeseable efecto de crear resonancias en el interior de la caja. Tradicionalmente se introduce un material absorbente en el interior para amortiguar estas resonancias internas.

La idea propuesta en [9] consiste en absorber esta radiación trasera utilizando un metamaterial del tipo multiresonador. Los resonadores están construidos como tubos de distintas longitudes doblados y compactados para ocupar poco espacio. Esta es una idea tomada de la literatura de metamateriales. Se puede obtener información adicional (descripciones y videos) de la página web de la empresa KEF: <https://us.kef.com/pages/metamaterial>.

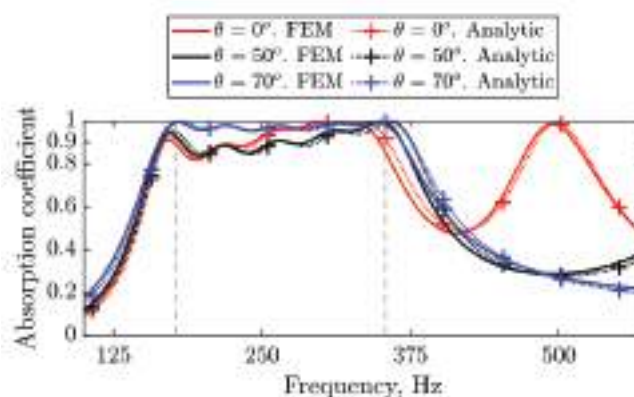


Figura 5. Comportamiento según la frecuencia del metamaterial optimizado con varios tipos de resonadores.

3. TENDENCIAS EN METAMATERIALES

La investigación en metamateriales acústicos ha estado dominada durante años por los descubrimientos acerca de los principios físicos que los gobiernan [1,2]. Se trata de ciencia básica más que aplicada. Se han descrito efectos sorprendentes que a menudo recuerdan otros análogos observados en óptica o ondas electromagnéticas en general, donde tienen lugar a una escala mucho menor. A menudo se alude a posibles futuras aplicaciones de estos descubrimientos sin demasiada concreción.

En los últimos años, sin embargo, hay una corriente creciente hacia diseños acústicos motivados por problemas concretos en ingeniería. Esta tendencia se ve en investigaciones más recientes como los tres ejemplos resumidos en este artículo y en artículos recopilatorios como [3], donde se hace más énfasis en las aplicaciones. Otros signos apuntan en esta dirección: en el reciente congreso *Phononics 2023* celebrado en Manchester, que es un congreso dominado por la física teórica, se decidió dar más énfasis a las aplicaciones en próximas ediciones.

La impresión del autor de este artículo es que la ciencia de metamateriales está entrando en una fase de madurez. Los

conceptos físicos están llegando a las mesas de trabajo de ingenieros y desarrolladores y dando lugar a productos que solucionan problemas. Todos debemos contribuir a que esta tendencia continúe.

4. CONCLUSIONES

Esta comunicación describe brevemente tres ejemplos de desarrollos que utilizan metamateriales acústicos y que están motivados por una aplicación acústica concreta. Existen muchos otros ejemplos. El autor postula que demuestran que existe una tendencia a investigaciones motivadas por casos reales en acústica y que ahora disponen de un cuerpo de teoría suficientemente sólido para generar resultados útiles.

5. REFERENCIAS

- [1] M. R. Haberman, M. D. Guild, Acoustic metamaterials. *Physics Today*, 69(6), 42–48 (2016). <https://doi.org/10.1063/PT.3.3198>.
- [2] S. A. Cummer, J. Christensen, A. Alù, Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nature Reviews. Materials*, 1(3), 16001 (2016). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>.
- [3] J. Zhang, B. Hu, S. Wang, “Review and perspective on acoustic metamaterials: From fundamentals to applications”, *Applied Physics Letters*, 123(1), 010502 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0152099>.
- [4] J. H. Vazquez Torre, J. Brunskog, V. Cutanda Henriquez, V., “An analytical model for broadband sound transmission loss of a finite single leaf wall using a metamaterial”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 147(3), 1697–1708 (2020). <https://doi.org/10.1121/10.0000923>.
- [5] J. H. Vazquez Torre, J. Brunskog, V. Cutanda Henriquez, J. Jung, “Hybrid analytical-numerical optimization design methodology of acoustic metamaterials for sound insulation”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 149(6), 4398–4409 (2021). <https://doi.org/10.1121/10.0005316>.
- [6] N. Jiménez, V. Romero-García, V. Pagneux, J.-P. Groby, “Rainbow-Trapping Absorbers: Broadband, Perfect and Asymmetric Sound Absorption by Subwavelength Panels for Transmission Problems”, *Scientific Reports* 7 (2017) 13595, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13706-4>.
- [7] D. M. Garza-Agudelo, V. Cutanda Henriquez, C. H. Jeong, P. R. Andersen, “Characterization and optimization of the angle dependent acoustic absorption of 2D infinite periodic surfaces of helmholtz resonators”, *Journal of Theoretical and Computational Acoustics* (2023). <https://doi.org/10.1142/S2591728522500104>.
- [8] D. M. Garza-Agudelo, V. Cutanda Henriquez, C. H. Jeong, P. R. Andersen, M. Ibarias, “Extending the angle range of high absorption of metasurfaces by adding a multilayered medium”, *Proceedings of the 24th International Congress of Acoustics*, 24th - 28th October 2022, GyeonGju (Korea).
- [9] S. Degraeve, J. Oclec-Brown, “Metamaterial Absorber for Loudspeaker Enclosures”, 148th Convention of the Audio Engineering Society, Convention Paper 10341, 2nd-5th June 2020.
- [10] V. Cutanda Henríquez, J. Sánchez-Dehesa, “Viscothermal Effects in a Two-Dimensional Acoustic Black Hole: a Boundary Element Approach”, *Phys. Rev. Applied* 15 (2021) 064057. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.15.064057>.
- [11] V. Cutanda Henríquez, V.M. García-Chocano, J. Sánchez-Dehesa, “Viscothermal losses in double-negative acoustic metamaterials”, *Phys. Rev. Appl.* 8 (2017) 014029, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.014029>, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.8.014029>.

ESTUDO NUMÉRICO DE SOLUÇÕES OTIMIZADAS DE ABSORÇÃO SONORA MULTICAMADA PARA MITIGAÇÃO DE RUÍDO FERROVIÁRIO

Laura Lourenço de Sousa^{1*}

Luís Godinho¹

Paulo Amado Mendes¹

¹ University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal

RESUMO

Materiais absorventes sonoros, tais como materiais porosos ou ressonantes, são utilizados em várias aplicações de engenharia. Estes são usados, por exemplo, para mitigar ou controlar níveis de ruído, reflexões ou difrações acústicas, e as condições acústicas em espaços com recetores sensíveis. Quando colocados sobre suporte de superfície rígido, esses materiais podem atingir uma alta absorção sonora, numa gama de frequências relativamente altas, se o comprimento de onda for mais reduzido do que a espessura do material absorvente. Por outro lado, as barreiras acústicas são medidas comuns de mitigação de ruído, geralmente implementadas próximo de estradas ou ferrovias, com eficiência comprovada. Em geral, estas soluções incorporam também materiais fonoabsorventes para reduzir a reflexão da energia sonora. Com o objetivo de mitigar o ruído ferroviário, este trabalho debruça-se sobre o estudo de materiais absorventes sonoros com base em soluções multicamada otimizadas, materializadas a partir de formulações de betão poroso. O método da matriz de transferência (TMM) é usado para prever e simular o desempenho desses materiais.

ABSTRACT

Sound absorbent materials, such as porous or resonant materials, are used in various engineering applications. They are used, among other uses, to mitigate or control noise levels, acoustic reflections or diffractions, and acoustics in critical receiver spaces. When placed with stiff surface backing, these materials can achieve high sound absorption over a broad range of relatively high frequencies if wavelengths are shorter than the material thickness. On the other hand, noise barriers are common noise mitigation measures usually implemented near roads or railways, with proven efficiency. In general, these solutions also incorporate sound absorbent materials to reduce the reflection of sound energy. In order to mitigate railway noise, this work focuses

on researching absorbent materials based on optimized multilayer solutions, materialized using porous concrete formulations. The transfer-matrix method (TMM) is used to design and simulate the acoustic performance of these materials.

Palavras Chave— Materiais absorventes porosos, Soluções acústicas multicamada, Absorção sonora

1. INTRODUÇÃO

Os níveis excessivos de ruído relacionados com a infraestrutura ferroviária, tanto durante a sua construção como na sua utilização, não são negligenciáveis e causam preocupação ao longo de todo o seu ciclo de vida. Principalmente quando próximo de áreas habitadas e áreas de proteção ambiental, essas preocupações são da maior importância, pois, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a exposição ao ruído prejudica gravemente a saúde humana e interfere nas suas atividades diárias [1]. Medidas de mitigação para reduzir o efeito destas fontes de ruído podem ser implementadas: na fonte sonora, através do desenvolvimento e valorização de estratégias de minimização do ruído gerado por estas fontes, quer ao nível do ruído aéreo e da propagação em meios sólidos, na via de transmissão, principalmente com sistemas isolantes, absorvedores e atenuantes, protegendo assim os múltiplos recetores [2]. Barreiras acústicas são medidas de mitigação amplamente utilizadas, devido à sua comprovada eficiência na proteção dos recetores sensíveis [3, 4]. A estas podem-se adicionar materiais fonoabsorventes, gerando assim um sistema de barreiras absorventes, que contribuem para a resolução de dois problemas particulares das barreiras acústicas, as reflexões duplas de veículos em barreiras laterais altas em galeria e as reflexões de barreiras de um lado da via. A adição de sistemas absorventes em um barreiras acústicas provou ser uma medida eficaz [5, 6].

* *Autor de contacto:* lrlldsousa@uc.pt

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Os sistemas absorventes podem ser constituídos, por exemplo, por materiais porosos. Estes são amplamente utilizados de modo a melhorar as condições acústicas ambiente, através das suas propriedades de absorção sonora. Existem vários tipos de materiais porosos, incluindo celulares, fibrosos e granulares, e alguns exemplos são polímeros porosos, fibras minerais e betão poroso [7].

Este tipo de material tem sido utilizado em inúmeras aplicações, nomeadamente como camada fonoabsorvente em barreiras acústicas próximas de rodovias e ferrovias, de modo melhorar a eficiência deste tipo de dispositivo de mitigação sonora. É composto por uma parte sólida e outra fluida, sendo que a dissipação da energia sonora ocorre devido à interação entre estas duas fases [5, 7]. Para estudar os materiais porosos podem ser utilizadas várias abordagens, nomeadamente experimentais e teóricas.

Modelos de fluido-equivalentes têm sido apresentados, considerando o módulo de compressibilidade complexo (“bulk modulus”) e a densidade fluido-equivalente para representar o comportamento absorvente dos materiais porosos estudados [5, 8-12]. Neste trabalho, o modelo de fluidos equivalentes proposto por Horoshenkov-Swift [8] é utilizado para calcular a absorção sonora a partir dos parâmetros macroscópicos medidos. Este modelo representa o comportamento das amostras porosas com base em quatro parâmetros macroscópicos: a resistividade ao fluxo de ar, a tortuosidade, a porosidade aberta e o desvio padrão do tamanho dos poros.

Diversos autores, como Pereira et al [13], que estudaram a influência de vários parâmetros, como a espessura, a proporção de água e o tamanho do grão no desempenho de absorção de sonora do betão poroso, têm utilizado este modelo de fluido equivalente. Sousa et al [14, 15] realizaram estudos comparativos entre resultados experimentais e teóricos de betão poroso, validando o modelo proposto por Horoshenkov-Swift, para o material em estudo.

Neste trabalho, apresenta-se uma otimização dos parâmetros macroscópicos, dos quais dependem a densidade e do módulo de compressibilidade de um material, num sistema poroso multicamada e, deste modo determinar a respetiva curva absorção sonora otimizada.

Metamateriais acústicos são considerados candidatos promissores para absorção sonora de banda larga sintonizável em toda a gama de frequências [16]. Neste trabalho é proposto um metamaterial acústico absorvente com multicamada. A célula unitária metaabsorvente compreende múltiplas camadas de betão poroso, associadas numa configuração em série. Portanto, o meta-absorvedor acústico montado poderá ser reconfigurável para possuir diferentes características de absorção.

O modelo analítico que se utiliza para estimar o comportamento das metassuperfícies aqui estudadas é baseado no método da matriz de transferência [9]. É implementado usando representações de fluido equivalente no sistema multicamada considerado.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho surge no seguimento de um conjunto de estudos mais alargado [13-15, 17]. Realizou-se previamente um estudo de amostras de betão poroso, que foi acusticamente caracterizado, quer experimentalmente e numericamente. Primeiro, os parâmetros macroscópicos do material foram determinados experimentalmente, utilizando um modelo de fluido equivalente para estimar a absorção sonora em condições de incidência normal. De seguida, o coeficiente de absorção sonora foi determinado para condições de incidência normal utilizando um tubo de impedância e para condições em campo difuso em câmara reverberante.

Através de regressões lineares procurou-se estabelecer uma relação entre a porosidade, a densidade e os restantes parâmetros macroscópicos, que permitisse obter a curva de absorção sonora através apenas dos primeiros parâmetros, que são de simples determinação experimental.

No seguimento deste objetivo, era também objetivo obter um sistema multicamada poroso, em que se faz variar os parâmetros macroscópicos de cada camada, de modo a otimizar a curva de absorção sonora, consoante a gama de frequências de interesse.

Tem-se como objetivo final da investigação em curso, a aplicação deste sistema multicamada numa barreira acústica, na face exposta ao ruído da ferrovia, de modo a melhorar a capacidade mitigadora de ruído da mesma, quando comparada com a solução sem sistema absorvente.

2.1. Algoritmo de inversão

Em Pereira et al. [13] utilizou-se um método inverso, baseado num algoritmo genético, para estimar teoricamente os parâmetros macroscópicos e obter uma nova curva de absorção sonora. Os parâmetros macroscópicos necessários para representar os materiais obtidos através do modelo de Horoshenkov e Swift obtiveram-se através de um método de inversão baseado num algoritmo genético, onde a função objetivo (1) se obtém a partir da soma do erro quadrático entre os resultados analíticos e experimentais, em todo o domínio da frequência:

$$Fu_{\alpha} = \sum_{i=1}^{nf} |\alpha_s^a - \alpha_s^e|^2, \quad (1)$$

onde: nf é o número de frequências discretas analisadas, α_s^a é o coeficiente de absorção obtido com o modelo de Horoshenkov e Swift, e α_s^e é o coeficiente de absorção experimental.



Figura 1. Diagrama do método de inversão utilizado para obtenção dos parâmetros macroscópicos.

Apresentaram-se valores de resistividade ao fluxo de ar e tortuosidade obtidos através do uso de um algoritmo de inversão, em função da densidade e da razão entre densidade e porosidade (ver (2) e (3)),

$$\sigma = 135.55e^{0.005\rho} \quad (2)$$

$$\alpha_{\infty} = 0.9655e^{0.000452\frac{\rho}{\phi}} \quad (3)$$

$$\sigma_p = 0.25 \quad (4)$$

onde: σ é a resistividade ao fluxo de ar, ϕ é a porosidade, ρ a densidade e σ_p é o desvio padrão do tamanho dos poros, que foi considerado constante.

Estabeleceram-se ainda a relações entre a porosidade e a densidade (ver Figura 1) para três misturas experimentais distintas de betão poroso (equações (5), (6) e (7), para os materiais 1, 2 e 3, respetivamente).

$$\rho = -1013.4\phi + 1133.1 \quad (5)$$

$$\rho = -1533.6\phi + 1131.8 \quad (6)$$

$$\rho = -1517.3\phi + 1182.6 \quad (7)$$

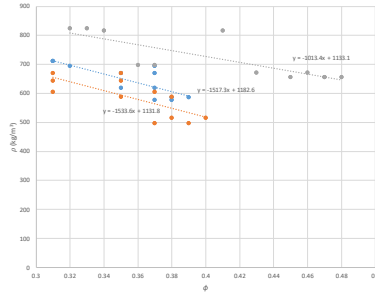


Figura 2. Relações entre a porosidade e a densidade para três misturas distintas de betão poroso.

2.2. Modelo de Horoshenkov e Swift

Os materiais porosos são constituídos por duas fases, sólida e fluida, tornando possível prever o seu comportamento através de modelos numéricos como fluidos equivalentes [5, 8, 9, 18]. Utilizou-se o modelo de Horoshenkov - Swift para materiais porosos granulares, adequado para amostras de betão poroso, como as estudadas. O modelo permite estimar o comportamento acústico a partir das propriedades macroscópicas do material. A partir desses parâmetros e considerando que o material poroso se comporta como um fluido equivalente, é possível determinar a impedância

característica e o número de onda do material. Os parâmetros considerados foram a porosidade, ϕ , a resistividade ao fluxo de ar, σ , a tortuosidade, α_{∞} , e o desvio padrão do tamanho dos poros, σ_p . Os autores sugerem determinar a densidade volumétrica e o módulo de compressibilidade com as equações (8) e (9), respetivamente:

$$\rho = \frac{\alpha_{\infty}}{\phi} \left(\rho_0 - \frac{j\phi\sigma}{\omega\alpha_{\infty}} \tilde{F}(\omega) \right), \quad (8)$$

$$C = \frac{\phi}{\gamma P_0} \left(\gamma - \frac{\rho_0(\gamma-1)}{\rho_0 - j\frac{\sigma\phi}{\omega\alpha_{\infty}N_{pr}} \tilde{F}(N_{pr}\omega)} \right), \quad (9)$$

onde: ω é a frequência angular, γ é a razão dos calores específicos, P_0 é a pressão atmosférica e N_{pr} é o número de Prandtl, e \tilde{F} é a função de correção da viscosidade, que pode ser apresentada na forma de uma aproximação de Padé como em (10):

$$\tilde{F}(\omega) = \frac{1+a_1\epsilon+a_2\epsilon^2}{1+b_1\epsilon}. \quad (10)$$

onde: $a_1 = \theta_1/\theta_2$, $a_2 = \theta_1$ e $b_1 = a_1$. Assumindo de forma simplificada que a geometria dos poros é circular, leva-se assim aos seguintes fatores de forma: $\theta_1 = \frac{4}{3}e^{4\xi} - 1$, $\theta_2 = \frac{e^{3\xi/2}}{\sqrt{2}}$, onde $\xi = (\sigma_p \ln(2))^2$ e $\epsilon = \sqrt{j\omega\rho_0\alpha_{\infty}/(\sigma\phi)}$. Com esses 2 parâmetros é possível obter a impedância característica e o número de onda de um material poroso. Que são determinados de acordo com as equações (11) e (12):

$$Z_c = \sqrt{\frac{\rho}{C}}, \quad (11)$$

$$k = \omega\sqrt{\rho C}, \quad (12)$$

2.3. Método da matriz de transferência (TMM)

O método da matriz de transferência (TMM-Transfer Matrix Method) foi adotado para a análise dos parâmetros macroscópicos, bem como do coeficiente de absorção sonora e respetiva otimização para estruturas de múltiplas camadas. Este modelo permite descrever a transmissão e reflexão de ondas sonoras através de um sistema de elementos acústicos, como no caso de materiais porosos com várias camadas [9]. O método permite descrever a transmissão e reflexão de ondas sonoras através de um sistema de elementos acústicos, como condutas, câmaras e materiais porosos. É um modelo que relaciona a pressão acústica e velocidade nas portas de entrada e saída do sistema, tendo em conta as propriedades acústicas de cada elemento e a geometria do sistema. Deste modo, é um excelente método para prever a absorção sonora e a perda por transmissão sonora de materiais multicamada lateralmente infinitos aglomerados em série [9].

A matriz de transferência entre as duas faces de um material 1D homogêneo e isotrópico, estendendo-se de $x = 0$ a $x = 1$, é

usada para relacionar a pressão sonora, p , e a velocidade normal das partículas acústicas, v , nas duas faces:

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} \cos(kl) & iZ\sin(kl) \\ i\sin(kl)/Z & \cos(kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=l}, \quad (13)$$

na qual o vetor de onda do material é definido como $k = \omega/c = \omega\sqrt{\rho/K}$, ω é a frequência angular, c é a velocidade de propagação do som, ρ é a densidade e K é o módulo de volume. A impedância acústica é definida como $Z = \sqrt{\rho K}$, e $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária. Uma convenção de tempo de Fourier $e^{i\omega t}$ é assumida [19]. A matriz de transferência, T , da célula unitária feita de duas subcamadas, A e B, é lida como:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_A \mathbf{T}_B, \quad (14)$$

em que:

$$\mathbf{T}_A = \begin{bmatrix} \cos(k_A l_A) & iZ_A \sin(k_A l_A) \\ i\sin(k_A l_A)/Z_A & \cos(k_A l_A) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} \cos(k_B l_B) & iZ_B \sin(k_B l_B) \\ i\sin(k_B l_B)/Z_B & \cos(k_B l_B) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

2.4. Método de otimização

O método de otimização aplicado tem como objetivo geral melhorar a curva de absorção sonora para um intervalo específico de frequências, mas tendo em conta os parâmetros macroscópicos das diferentes camadas do material absorvente.

Tal significa determinar os valores ideais para a porosidade e densidade, em várias camadas do material, de modo a minimizar o valor calculado pela função objetivo/de custo que depende dos parâmetros de entrada, porosidade e densidade, e de relações com os restantes parâmetros macroscópicos (equações (2) a (7)), obtendo assim melhores configurações do material multicamada, para otimizar o desempenho da metassuperfície.

3. RESULTADOS

Realizou-se um estudo paramétrico abrangente para analisar a otimização dos parâmetros macroscópicos e a determinação de soluções de absorção sonora, em condições de campo difuso, específicas para certos intervalos de frequências específicos. Analisou-se para 2 intervalos em altas frequências, 2 em médias frequências e para um intervalo referente a um espectro de frequências associado ao ruído da ferrovia (400-4000 Hz).

Para a metassuperfície, considerou-se que esta é composta por camadas de um material poroso. Fez-se variar o número de camadas do sistema, em 2, 4 e 6. Também se variou a espessura total do sistema multicamada, em 12, 14, 17 e 20 cm. Ainda se fez uma comparação entre as curvas de

absorção sonora dos 3 materiais (ver 2.1. Algoritmo de inversão).

Na Figura 3, apresentam-se resultados de parâmetros macroscópicos e densidade do material 1, otimizados para um sistema com 4 camadas (numeradas de 1 a 4 desde a camada rígida de suporte até à camada exterior à superfície) e uma espessura total de 20 cm e, na Figura 4, as respetivas curvas de absorção sonora inicial e otimizada. Neste caso, a otimização foi realizada na gama de frequências dos 400 aos 4000 Hz.

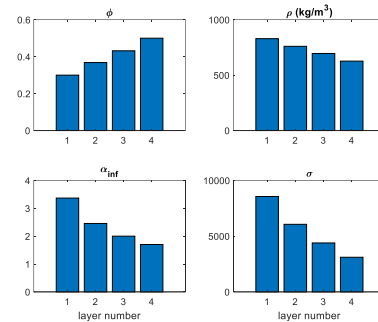


Figura 3. Parâmetros macroscópicos e densidade, otimizados para cada uma das 4 camadas (1 é a camada mais interior e 4 a camada mais superficial), com espessura total de 20 cm.

Para esta configuração, observa-se que a camada mais superficial (4) é a mais porosa e que a porosidade vai diminuindo com as camadas para o interior. Por outro lado, a densidade e a resistividade ao fluxo de ar apresentam um comportamento inverso, isto é, aumentam à medida que a camada se torna mais interior. Quando a otimização é realizada na gama de frequências mais alta as duas camadas interiores tendem a ser muito semelhantes entre si.

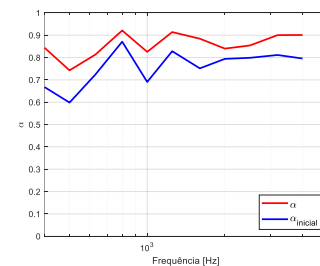


Figura 4. Curvas de absorção sonora inicial e otimizada para uma metassuperfície com 4 camadas e espessura total de 20 cm.

Como esperado, verifica-se que a curva de absorção otimizada apresenta amplitudes de absorção superiores, em todo o espectro de frequências analisado, quando comparada com a curva inicial. Apesar de continuar a apresentar uma quebra considerável entre os 300 e 800 Hz, apresenta valores de absorção consideravelmente superiores.

Realizou-se uma análise comparativa com as curvas de absorção sonora obtidas para o mesmo material, mesma espessura e mesmo número de camadas para diferentes gamas de frequências de interesse (ver Figura 5). Conseguem-se obter valores de amplitude máxima de coeficiente de

absorção sonora superiores na otimização nas altas frequências.

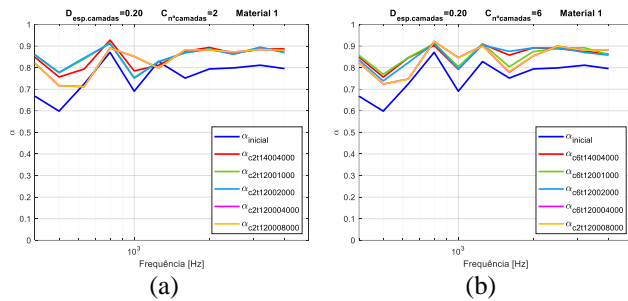


Figura 5. Curvas de absorção sonora para uma espessura de 20 cm, com material 1, para diferentes intervalos de frequências e com número de camadas igual a 2 (a) e 6 (b).

Na generalidade, as curvas otimizadas apresentam curvas de absorção sonora com melhor desempenho que a curva inicial. Na gama de frequências otimizadas, apresentam-se claramente marcadas as zonas de otimização consideradas (Figura 5). Por exemplo, analisando as curvas de absorção referentes à gama de otimização dos 200 aos 1000 Hz, $\alpha_{c2t12001000}$, $\alpha_{c4t12001000}$ (gráfico não apresentado) e $\alpha_{c6t12001000}$, estas apresentam os valores de absorção com maior amplitude quando comparadas às restantes curvas.

Dentro de uma mesma gama de frequências, de 400 a 4000 Hz, e fazendo variar a espessura do sistema, para o material 1 e para número de camadas igual a 2, 4 e 6, analisou-se a influência deste parâmetro. Na Figura 6, apresentam-se os resultados para o número de camadas igual a 2 e 6.

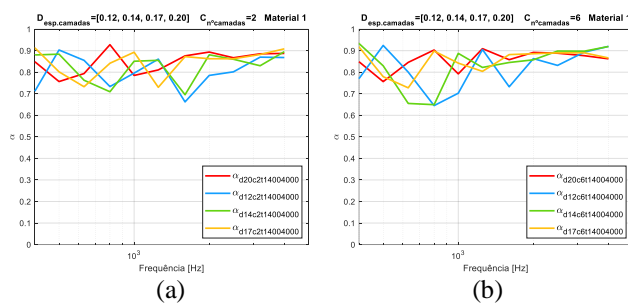


Figura 6. Influência da espessura do sistema para o material 1 e para número de camadas igual a 2 (a) e 6 (b).

Até aos 700 Hz as curvas referentes a espessuras de 14 e 17 cm apresentam amplitudes de absorção sonora superiores às restantes curvas, atingindo picos de amplitude de cerca de 0,9, para número de camadas igual a 2 (a) e 6 (b). Nas altas frequências, as curvas tendem a aproximar-se mais entre elas, para todas as configurações. A primeira quebra observada em todas as curvas parece ser influenciada pela espessura total do sistema, sendo que acontece mais cedo para espessuras do sistema maiores.

Determinaram-se ainda, para as mesmas configurações acima referidas, as curvas de absorção para os três materiais baseados em betão poroso, para os quais se estabeleceram as relações entre a porosidade e a densidade (ver equações (5), (6) e (7)). Apresentam-se, na Figura 7 resultados relativos à configuração com 20 cm de espessura, 4 camadas e gama de frequências dos 400 aos 4000 Hz, para os três materiais.

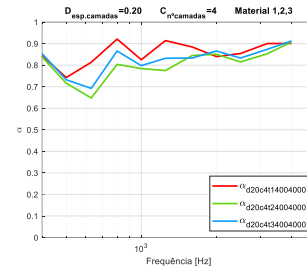


Figura 7. Curvas de absorção sonora para a configuração com 20 cm de espessura e 4 camadas para os três materiais do tipo betão poroso.

Procurou-se ainda analisar a influência do número de camadas nas curvas de absorção sonora (Figura 8).

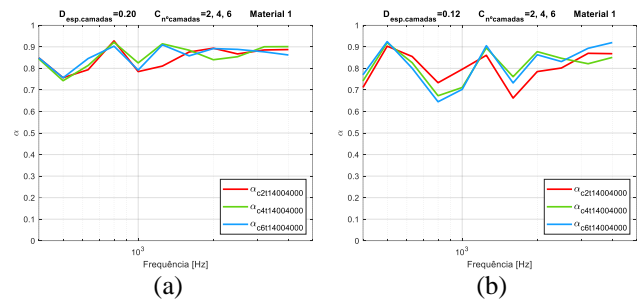


Figura 8. Curvas de absorção sonora para a configuração com 20 (a) e 12 cm (b) de espessura, com 2, 4 e 6 camadas.

Quando comparadas as curvas de absorção para diferentes números de camadas, observa-se que as curvas referentes às configurações com 2 camadas de material poroso apresenta um comportamento mais distinto, em geral com menores amplitudes de absorção sonora, em relação às restantes curvas. Por outro lado, verifica-se que as curvas referentes a sistemas com 4 e 6 camadas apresentam comportamentos semelhantes, sobretudo para as espessuras de 20, 17 (não apresentado) e 12 cm. É assim possível observar que não é necessário um número elevado de camadas para obter uma boa relação camada/curva de absorção sonora, permitindo diminuir a quantidade de materiais utilizados.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho tinha como objetivo analisar um sistema absorvente multicamada poroso, em que se variam os parâmetros macroscópicos em cada camada, de modo a

otimizar a curva de absorção sonora, consoante a gama de frequências de interesse. Realizou-se um estudo paramétrico bastante abrangente. Nos resultados obtidos, verificam-se claramente as gamas de frequências em que se realizou a otimização. Verificou-se que as análises para as configurações com 4 e 6 camadas, e restantes parâmetros iguais, resultam em curvas de absorção sonora relativamente semelhantes. Igualmente, para espessuras de sistema com 17 e 20 cm obtém-se curvas de absorção sonora com comportamentos semelhantes, sobretudo nas altas frequências. Tais comportamentos sugerem que uma maior espessura ou quantidade de camadas, não garante necessariamente um melhor desempenho do sistema, permitindo assim desenvolver sistemas absorventes multicamada eficientes e com uso de menores quantidades de materiais.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE sob referência LA/P/0112/2020, e pelos fundos FEDER através do COMPETE 2020, Portugal 2020, no âmbito dos projetos POCI-01-0247-FEDER-033990 (iNBrail), POCI-01-0247-FEDER-046111 (FERROVIA 4.0) e PTDC/ECI-EGC/3352/2021 (IntRail).

6. REFERÊNCIAS

- [1] WHO. *Health Topics. Environment and health. Noise, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen (Denmark), 2021.* Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/noise>
- [2] R. A. Ibrahim, "Recent advances in nonlinear passive vibration isolators, *Journal of sound vibration*, Vol 314 (3-5), 2008, pp 371-452."
- [3] X. Zhang, R. Liu, Z. Cao, X. Wang, and X. Li, "Acoustic performance of a semi-closed noise barrier installed on a high-speed railway bridge: Measurement and analysis considering actual service conditions, *Measurement*, Vol 138, 2019, pp 386-399."
- [4] S. Kefhalopoulos, M. Paviotti, and F. Anfosso-Lédée, *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), EUR 25379 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.*
- [5] T. Cox and P. d'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application, Crc Press, New York (United States of America), 2nd Edition, 2016.*
- [6] D. C. Hothersall, K. V. Horoshenkov, P. A. Morgan, and M. J. Swift, "Scale modelling of railway noise barriers, *Journal of Sound Vibration*, Vol 234 (2), 2000, pp 207-223."
- [7] F. J. Fahy, *Foundations of engineering acoustics, Academic Press, Southampton (United Kingdom), 1st Edition, 2000.*
- [8] K. V. Horoshenkov and M. J. Swift, "The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 110 (5), 2001, pp 2371-2378."
- [9] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials, John Wiley & Sons, Chichester (United Kingdom), 2nd Edition, 2009.*
- [10] J. F. Allard and Y. Champoux, "New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 91 (6), 1992, pp 3346-3353."
- [11] R. Panneton, "Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 122 (6), 2007, pp EL217-EL222."
- [12] Y. Champoux and J. F. Allard, "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, *Journal of Applied Physics*, Vol 70 (4), 1991, 1975-1979."
- [13] M. Pereira, J. Carbajo San Martín, L. Godinho, P. Amado-Mendes, D. Mateus, and J. Ramis-Soriano, "Acoustic behavior of porous concrete. Characterization by experimental and inversion methods, *Materiales de Construcción*, Vol 69 (336), 2019, pp e202."
- [14] L. Lourenço de Sousa, L. Pereira, L. Godinho, and P. A. Mendes, "Acoustic properties of porous concrete-Experiments and modelling, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings 2020*, Seul, Korea, August 23-26, 2020, Vol 261 No 6, pp 127-137, Institute of Noise Control Engineering."
- [15] L. Lourenço de Sousa, L. Pereira, D. Ramos, L. Godinho, and P. A. Mendes, "Acoustic absorption of porous concrete – normal incidence vs diffuse field conditions, *Euronoise Congress and Conference Proceedings 2021*, Madeira, Portugal, October 25-27, 2021, pp 239-248."
- [16] S. Kumar, H. Jin, K. M. Lim, and H. P. Lee, "Comparative analysis of machine learning algorithms on prediction of the sound absorption coefficient for reconfigurable acoustic meta-absorbers."
- [17] L. Sousa, L. Pereira, D. Montes-González, D. Ramos, P. Amado-Mendes, J. M. Barrigón-Morillas, *et al.*, "Experimental Analysis and Simulation of a Porous Absorbing Layer for Noise Barriers," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 2638, 2023.
- [18] R. Panneton, N. Atalla, and F. Charron, "A finite-element formulation for the vibroacoustic behaviour of double-plate structures with cavity absorption, *Canadian Aeronautics Space Journal*, Vol 41 (1), 1995, pp 5-12."
- [19] N. Jiménez, O. Umnova, and J.-P. Groby, "Acoustic waves in periodic structures, metamaterials, and porous media," *Ch. the Transfer Matrix Method in Acoustics, Springer International Publishing, Cham*, pp. 103-164, 2021.

NUMERICAL STUDY OF SYMMETRIC HEXAGONAL ACOUSTIC METASURFACE FOR SOUND TRANSMISSION LOSS UNDER NORMAL INCIDENCE

Ramos D. ^{1*}; Godinho L. ¹; Amado-Mendes P. ¹; Mareze P. ²

¹University of Coimbra, ARISE, ISE, Department of Civil Engineering

²Federal University of Santa Maria, Department of Structures and Civil Construction, Acoustic Engineering

ABSTRACT

The interest in sound wave propagation on subwavelength regimes is a widely researched field. In this context, acoustic metamaterials have arisen as a potential source of new technologies for the development of lightweight acoustical devices in subwavelength dimensions. Previously research has evidenced the capacity of symmetric acoustic systems to achieve impressive acoustical behaviours, as an example, perfect sound absorption in wide broadband, enabled by the critical coupling of resonators with distinct resonances in symmetric axially located system. This work, analyses the sound transmission loss in these system types, through a finite element model. The objective of this research is to understand the applicability of these devices in the development of compact attenuators with potential application in different contexts of engineering, especially on ventilated systems in buildings.

Keywords – Acoustic metamaterials, sound transmission loss, passive ventilation, Helmholtz resonators.

1. INTRODUCTION

In acoustics, the interest in manipulating the sound wave propagation at low-frequencies has been the target of several scientific studies, and, in recent years, several attempts have been made in the development of acoustic metamaterials for that purpose, enabling non-natural physical behaviours. As a result, the usage of a Helmholtz resonator for the development of these tailored systems due to their resonant behaviours can deal with the dissipative effects at audible frequencies below 1kHz, originating new approaches, such as the broadband absorbing materials [1,2]; improvements of sound insulation [3]; acoustic cloaking [4]; acoustic black hole [5]; vibration dampening [6], possible by locally resonant elements theory.

Previous research [1] considers the axial coupling of locally resonant structures to achieve wideband perfect sound absorption; however, it does not extend to the sound transmission properties. Thus, through finite element models, the authors expand these developments to sound transmission loss analyses. A brief validation of the finite element model is performed through an analytical description using the fluid equivalent Johnson-Champoux-Allard model for rigid frame [7], and a Transfer Matrix approach. Then, experimental

evaluation was done using a simplified Three-Microphone impedance tube approach [8] to retrieve the normal Sound Transmission Loss (nSTL). Finally, a symmetric acoustic metamaterial composed of axially coupled Helmholtz resonators tuned for different frequencies is studied to propose a strategy to achieve an improved transmission loss.

This article is organized as follows: In section 2, the authors propose the acoustical metasurface and the respective geometrical descriptions. Then, in section 3, the involved mathematical models and methods of evaluation are described, as well as a brief analytical description of the viscous thermal losses involved, the finite element description, and a brief experimental description of the validation method using a three-microphone approach. Finally, the adopted theoretical models will be discussed, with the main conclusions summarized in section 5.

2. DESIGN AND MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE ACOUSTIC METASURFACE

2.1. Geometrical description

Figure 1 presents a scheme of the proposed acoustic metasurface, as illustrated in Figure 1(a), composed of n hexagonal meta unitary cells, as illustrated in Figure 1(b). Thus, the symmetric system is composed of six Helmholtz resonators, axially coupled in a waveguide with a cross-sectional radius r_w and length l_w .

Consider the Helmholtz resonator, with the neck dimensions given by, $l_{neck}^{[n]}$ and $w_{neck}^{[n]}$, corresponding to the length and the width, respectively, and the superscript $[n]$ being the order of the included resonator. By mathematical simplification, consider the resonant cavity as a parallelepiped, with length and width, $l_{cav}^{[n]}$ and $w_{cav}^{[n]}$, respectively. In this system, assume that the acoustic waves propagate in the same direction as the z axis of the waveguide, the discontinuity between the acoustic field of radius r_t , and the waveguide of radius r_w is accounted for, resulting in an alteration in the fluid velocity.

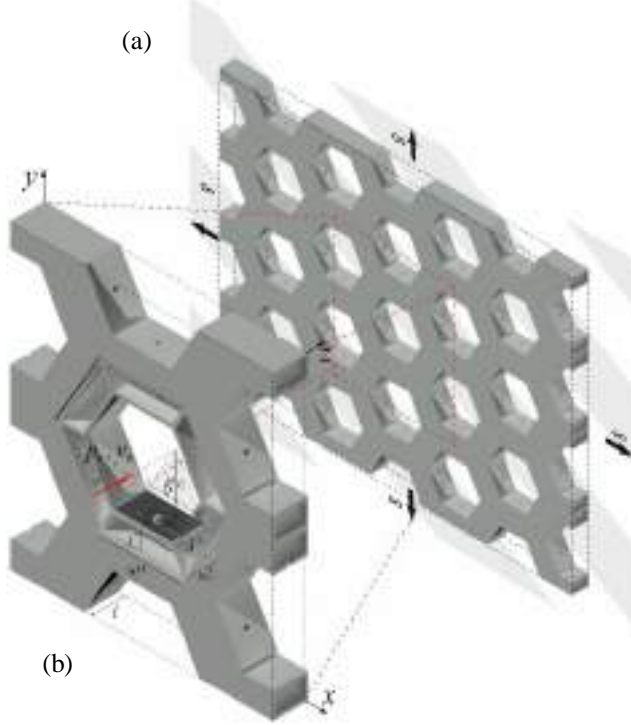


Figure 1. (a) The conceptual proposition of infinite acoustic metasurface. (b) Schematic view of a unit cell.

3. EVALUATION METHODS

3.1. Viscous thermal losses

It is important to understand that the dissipative losses in narrow channelled cross-sections play a significant role in the acoustic description and mathematical modelling of acoustic systems. The viscothermal losses in the resonator's parts can be accounted for by equivalent complex quantities, e.g. effective mass density ρ_{eff} [9] and effective bulk modulus B_{eff} [10], described as follows:

$$\rho_{eff}(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left(1 + \frac{\phi \sigma}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \left(1 + j \frac{4 \omega \rho_0 \eta \alpha_\infty^2}{\sigma^2 \phi^2 \Lambda^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (1)$$

$$B_{eff}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8 \eta}{j \omega P_0 \rho_0 \Lambda^2} \left(1 + \frac{\omega P_0 \rho_0 \Lambda^2}{16 \eta} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1}}. \quad (2)$$

The description of the viscous effects inside the inlet hole as well as the acoustic fluid distortion in the outer rigid layer are strictly controlled by the specific airflow resistivity, given by [7]:

$$\sigma = \left(\frac{2 l_n}{r_h} + 4 \right) \frac{R_s}{\phi l_n}, \quad (3)$$

being, ϕ , the porosity is equal to 1 [-]; the resistive term, R_s , is the surface resistance, which corresponds to the flux distortion dependent on the angular frequency ω , expressed by [7]:

$$R_s = \frac{\sqrt{2 \eta \omega \rho_0}}{2}. \quad (4)$$

The distortion of the acoustic flow due to the sudden change in cross-section associated with the inertial load due to sound radiation, expresses the reactive portion, through the geometric tortuosity, $\alpha_\infty = 1$, the thermal and viscous characteristics lengths, Λ and Λ' , are numerically equal to the hydraulic radius, $r_n = w_n / \sqrt{\pi}$.

Consequently, for analytical considerations, the transfer matrix \mathbf{T} expresses the relationship between the parts of the system, in the initial moment, p_1 and v_1 , respectively, to the final moment, p_2 and v_2 , with the assembly of matrix elements being written by:

$$\mathbf{T} \begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix}_{x=0} = \mathbf{T}_w^{[n]} \mathbf{T}_{HR}^{[1]} \dots \mathbf{T}_{HR}^{[n-1]} \mathbf{T}_{HR}^{[n]} \mathbf{T}_w^{[n]} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix}_{x=l}. \quad (5)$$

Here, the sound wave radiation for an arbitrary segment part of the system, herein represented by $\mathbf{T}_i^{[n]}$, is expressed by the transfer matrix:

$$\mathbf{T}_i^{[n]} = \begin{bmatrix} \cos(k_i^{[n]} l_i) & j Z_i^{[n]} \sin(k_i^{[n]} l_i) \\ j \sin(k_i^{[n]} l_i) / Z_i^{[n]} & \cos(k_i^{[n]} l_i) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

where $k_i^{[n]}$ and l_i , are, respectively, the wavenumber and length of the waveguide, and $Z_i^{[n]}$ is the characteristic impedance of the waveguide.

3.2. Numerical Verification

To investigate the acoustic behaviour of the proposed acoustic metamaterial (AMM), a three-dimensional (3D) finite element model has been implemented with the commercial software COMSOL Multiphysics 5.3. As illustrated in Figure 2, the finite element model represents a simplified approach to retrieve the sound transmission loss under normal incidence. Initially, assuming the time-harmonic dependence ($e^{j\omega t}$), in linear regime, the periodicity condition is imposed in a two-port model, being by the respective incident and transmitted pressure fields, p_{inc} and p_{trans} .

The main domain consists of a cylindrical acoustic field, with a radius r_t , defined as air, with mass density ($\rho_0 = 1.23 \text{ kg/m}^3$), air dynamic viscosity ($\eta = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$), and ambient pressure $P_0 = 101325 \text{ Pa}$.

The acoustic excitation of the system, at the left side, is an incident plane acoustic wave of unitary amplitude (1 Pa), impinging and propagating under normal incidence, originated in a sound hard boundary (SHB). To eliminate reflections of the scattered sound waves originating from planar sound waves at normal incidence, at the end surfaces of the main domain, two perfectly matched layers (PML) are imposed, discretized with twelve elements in the z-direction. In addition, all external surfaces of the domain are defined as perfectly rigid and reflective.

The discretization of the finite element model has been performed using tetrahedral elements, as illustrated in Figure 2, with the maximum element size given by $\lambda_{\min}/8$, where $\lambda_{\min} = c_0/f_{\max}$ is the smallest acoustic wavelength within the simulated range of frequencies, corresponding to a maximum

frequency of 1kHz, what denotes eight elements per wavelength in the discretized main domain.

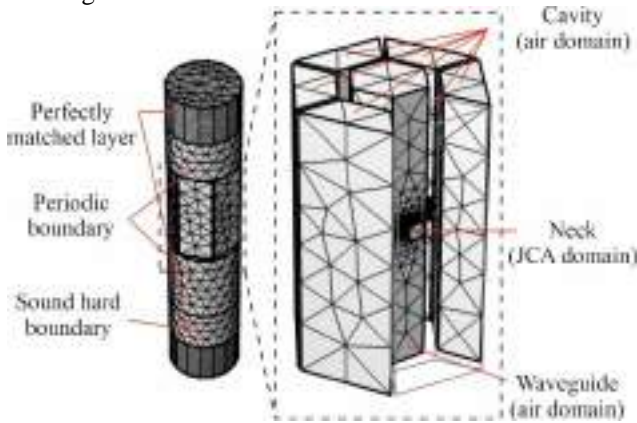


Figure 2. A finite element model discretization of the proposed AMM unit cell.

The narrow domains were modelled as three-dimensional tetrahedral elements, and their discretization was performed in parts, as follows: in the necks of the HRs, the maximum mesh size is $w_n^{[n]}/4$ and the minimum size is $d_v/2$, where $d_v = \sqrt{2\mu/\rho_0\omega}$ is the thickness of the viscous boundary layer; by simplifications, in the cavities, assuming the discontinuity of the cross-section in the volumetry, and considering the reduction of the dissipative effects inside the same, the maximum mesh size is $w_c^{[n]}/2$ and $w_c^{[n]}/4$ as the minimum mesh size.

The sound transmission loss (STL) is subsequently calculated considering the pressure level difference between the two pressure fields, according to the equation:

$$STL = 20 \log \left| \frac{p_{inc}}{p_{trans}} \right|. \quad (7)$$

3.3. Specimens production and experimental validation analysis

A preliminary experimental analysis has been performed within the scope of this work. Considering the dimensions of a cylindrical impedance tube of 37.5 mm inner diameter, for validation purposes of the mathematical approaches, experimental measurements of normal sound transmission loss was performed in laboratory conditions, following a simplified three-microphone transfer function approach previously described in [8], as illustrated in figure 3(a), as alternative to the standard method ASTM E2611 [11].

A printed sample AMM cell is illustrated in Figure 3(b), produced using a Blocks One 3D printer with Polylactic Acid (PLA) and equipped with a nozzle extruder with 0.4mm. This sample is intended to be experimentally evaluated according to the above mentioned three-microphone approach, alternative to the standard methodology described in ASTM E2611 [11].



Figure 3. (a) Image of the implemented measurement setup. (b) Photograph of a printed AMM cell.

As a validation, assuming the approaches previously presented, Figure 4 shows the nSTL of the acoustic metamaterial computed using the TMM (solid lines) and the finite element method (cross markers), together with experimental measurements (circle markers).

In Figure 4, results from the three samples can be analysed; first, the grey plots represent the results considering just the waveguide, without any HRs; second, in red, the single system tuned for a resonance frequency of 950Hz can be observed; and, finally, the plotted blue curves correspond to HRs with a resonance frequency of 1075Hz. These results show there is good agreement between the implemented methods when computing the transmission loss properties of the AMM cell.

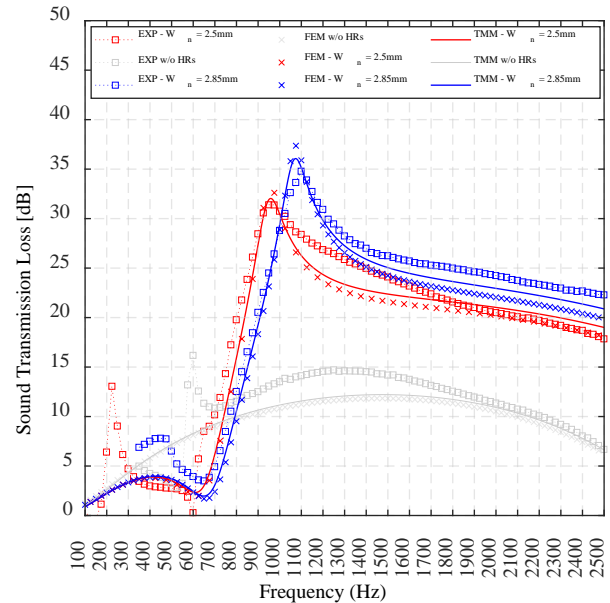


Figure 4. Validation of the nSTL for a single symmetric proposition for three approaches developed. The solid lines represent the TMM results, the cross markers the numerical results, and the square markers the experimental results, respectively.

4. RESULTS

4.1. nSTL for a single symmetric system

First, we analyse the nSTL capacity of the unit cell with six resonators attached, tuned to the same resonance frequency, $f_1^{single} = 950\text{Hz}$. The geometric parameters corresponding to each resonator are defined in Table 1.

Table 1. Geometrical parameters (mm) of the single HR proposition AMM.

$w_n^{[n]}$ (mm)	$l_n^{[n]}$ (mm)	$w_c^{[n]}$ (mm)	$l_c^{[n]}$ (mm)	f_l^{TL} (Hz)	f_u^{TL} (Hz)	f_{range} (Hz)
2.5	2.5	21	10	840	2300	950

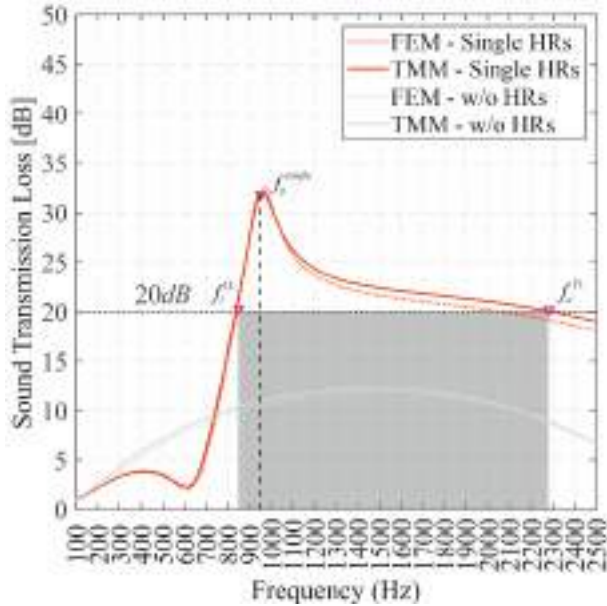


Figure 5. Evaluation of the nSTL for a single symmetric proposition for one resonant frequency $f_1 = 950\text{ Hz}$. The solid lines represent the TMM results, and the dotted lines the numerical FEM results, respectively.

Figure 5 presents the results of normal sound transmission loss, with the numerical and analytical approaches, observing the highest values of the nSTL of around 30dB at the specified frequency. It is interesting to note that a nSTL above 20dB (black dashed line), in the interval of $f_l^{TL} = 835\text{Hz}$ for the lower bound and $f_u^{TL} = 2295\text{Hz}$ for the upper bound, can be observed.

The values obtained by numerical prediction and analytical approaches present good agreement. Given the possibility of axial coupling of HRs in different geometric configurations, next, two different designs will be proposed to study the possibility of expanding the frequency band without varying the total thickness of the structure.

4.2. Normal sound transmission loss for the multi-resonance proposition

In this section, in order to illustrate the effect of coupled resonances in axial devices, initially, we present a proposal for double resonance effect, in Figure 6. Here, considering the coupling of the set of three identical resonators tuned at two resonance frequencies, at $f_1^{dual} = 950\text{ Hz}$ and $f_2^{dual} = 1200\text{ Hz}$, respectively, with the geometric parameters defined in Table 2.

Table 2. Geometrical parameters (mm) of the dual HR proposition AMM.

$w_n^{[n]}$ (mm)	$l_n^{[n]}$ (mm)	$w_c^{[n]}$ (mm)	$l_c^{[n]}$ (mm)	f_l^{TL} (Hz)	f_u^{TL} (Hz)	f_{range} (Hz)
2.5	2.5	21	10	875	2425	950
32	2.5	21	10			1200

Figure 6 presents the nSTL calculated through the two mathematical approaches previously described. Again, in this plot, the grey shade indicates the frequency range for which a minimum nSTL of around 20dB is obtained. It is evident that when the coupling of a set of HRs tends to reduce the transmission peaks, however, this effect does not affect the overall transmission loss of the system, increasing the interval with $nSTL > 20\text{dB}$ to a range of $f_l^{TL} = 835\text{Hz}$ for the lower bound and $f_u^{TL} = 2450\text{Hz}$ for the upper bound.

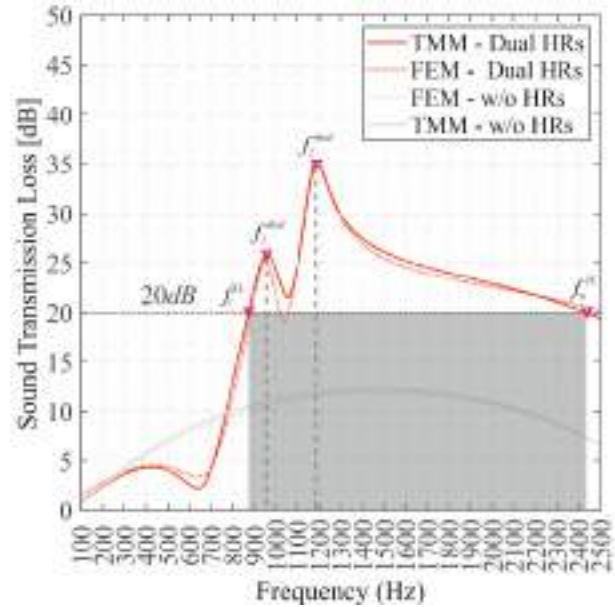


Figure 6. Evaluation of the nSTL for a dual symmetric proposition for two different frequencies $f_1 = 950\text{ Hz}$ and $f_2 = 1200\text{ Hz}$. The solid lines represent the TMM results, and the dotted lines the numerical results, respectively.

Finally, in the third case, the coupling between three resonant frequencies, $f_1^{triple} = 950\text{Hz}$, $f_2^{triple} = 1200\text{Hz}$

and $f_3^{triple} = 1425\text{Hz}$, respectively, with the geometric parameters defined in table 2 is analyzed.

Table 3. Geometrical parameters (mm) of the triple HR proposition AMM.

$w_n^{[n]}$ (mm)	$l_n^{[n]}$ (mm)	$w_c^{[n]}$ (mm)	$l_c^{[n]}$ (mm)	f_l^{TL} (Hz)	f_u^{TL} (Hz)	f_{range} (Hz)
2.5	2.5	21	10	890	~3000	950
3.2	2.5	21	10			1200
4.0	2.5	21	10			1425

Figure 7 presents the results of normal sound transmission loss, for the numerical and analytical approaches. Considering, again, a minimum nSTL around 20dB (black dashed line), it is possible to observe that this value is attained at frequencies between $f_l^{TL} = 875\text{Hz}$ and f_u^{TL} higher than 2500Hz.

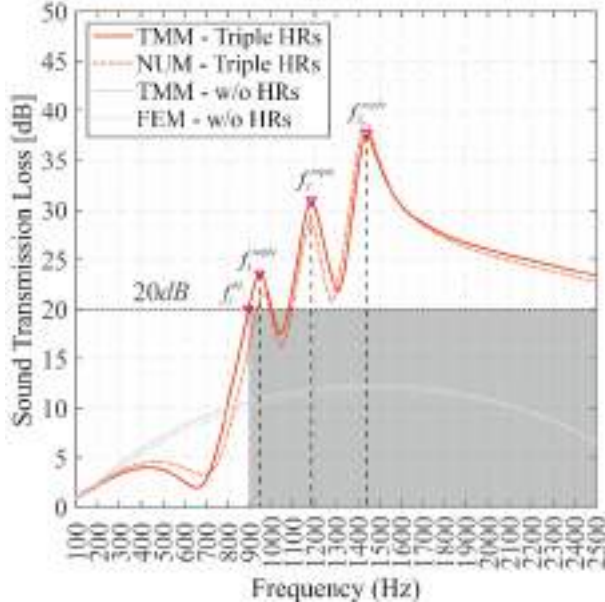


Figure 7. Evaluation of the nSTL for a triple symmetric proposition for three different frequencies $f_1 = 950\text{ Hz}$, $f_2 = 1200\text{ Hz}$ and $f_3 = 1425\text{ Hz}$. The solid lines represent the TMM results, and the dotted lines the numerical results, respectively.

The findings indicate that the transmission loss peaks can be adjusted to achieve desirable transmission characteristics by varying the geometrical configurations of the HRs. This shows the potential for optimizing the meta-structure's geometry further, intending to broaden frequency bands and increase the amplitude of normal sound transmission loss. Nevertheless, this study already demonstrates that the meta-structure, utilizing the classic HR model coupling, effectively reduces sound transmission within the low to middle frequency range while maintaining compact structural dimensions.

5. CONCLUSIONS

In the present work, a numerical study of the sound transmission characteristics of acoustical metasurface composed by the axial coupling of Helmholtz resonators was presented. The proposition consists of symmetrical and axial coupling of six Helmholtz resonators, working at three conditions, the first, the single HR proposition, consists of the coupling of all the six HRs tuned at the same resonant frequency; enabling a high transmission loss capacity higher than 30dB at the peak of the specified frequency $f_{single} = 950\text{Hz}$; at second, the dual proposition, consisted in achieving two resonance frequency $f_1^{dual} = 950\text{ Hz}$ and $f_2^{dual} = 1200\text{ Hz}$, enabling two transmission peaks, around 25dB and 35dB at specified frequencies, respectively. Finally, the third proposition, the transmission loss could be achieved at f_1^{triple} , f_2^{triple} , and f_3^{triple} , in the frequencies, 950Hz, 1200Hz and 1425Hz, respectively.

Another important remark is the implementation of a measurement three-microphone method [8] as an alternative method to the ASTM E2611 [11].

In future works, the aim will be to expand the optimization methods of normal sound transmission loss under normal and diffuse conditions. It is expected that the obtained results demonstrate that the axial coupling resonators are important contributions to the research and development of AMM applications in noise insulation in ventilated system panels.

6. ACKNOWLEDGMENTS

This work is financed by national funds through FCT - Foundation for Science and Technology, under grant agreement UI/BD/150864/2021 attributed to the 1st author, and by FCT / MCTES through national funds (PIDDAC) under the R&D Unit Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), under reference UIDB/04029/2020, and under the Associate Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems ARISE under reference LA/P/0112/2020.

7. REFERENCES

- [1] Ramos D, Godinho L, Amado-Mendes P, Mareze P. Broadband low-frequency bidimensional honeycomb lattice metastructure based on the coupling of subwavelength resonators. *Appl Acoust* 2022;199:109038. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109038>.
- [2] Jiménez N, Romero-García V, Pagneux V, Groby J-PP. Rainbow-trapping absorbers: Broadband, perfect and asymmetric sound absorption by subwavelength panels for transmission problems. *Sci Rep* 2017;7:13595. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13706-4>.
- [3] Langfeldt F, Khatokar AJ, Gleine W. Plate-type acoustic metamaterials with integrated Helmholtz resonators. *Appl Acoust* 2022;199:109019. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109019>.

- [4] Jo C, Jeong J, Kwon BJ, Park KC, Oh IK. Omnidirectional two-dimensional acoustic cloak by axisymmetric cylindrical lattices. *Wave Motion* 2015;54:157–69. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2014.12.004>.
- [5] Umnova O, Brooke D, Leclaire P, Dupont T. Multiple resonances in lossy acoustic black holes - theory and experiment. *J Sound Vib* 2023;543:117377. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117377>.
- [6] Sangiuliano L, Reff B, Palandri J, Wolf-Monheim F, Pluymers B, Deckers E, et al. Low frequency tyre noise mitigation in a vehicle using metal 3D printed resonant metamaterials. *Mech Syst Signal Process* 2022;179:109335. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109335>.
- [7] Atalla N, Sgard F. Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *J Sound Vib* 2007;303:195–208. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.01.012>.
- [8] Salissou Y, Panneton R, Doutres O. Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones. *J Acoust Soc Am* 2012;131:EL216–22. <https://doi.org/10.1121/1.3681016>.
- [9] Johnson DL et al. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J Fluid Mech* 1987;176:379-402.
- [10] Champoux Y, Allard JF. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J Appl Phys* 1991;70:1975–9. <https://doi.org/10.1063/1.349482>.
- [11] ASTM E2611. Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. *ASTM Int* 2009:1–14. <https://doi.org/10.1520/E2611-09.2>.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AMS-0 Acústica musical.

ANÁLISIS VIBRATORIO DE VIOLINES PARA ESTIMAR SU PRECIO BASADO EN TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING

Isabel Villa Ruiz^{1*}
Leticia Martínez Cano²
Roberto San Millán Castillo¹
Rebeca Goya Esteban¹

¹Universidad Rey Juan Carlos – EIF - Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Camino del Molino, 5, Fuenlabrada (Comunidad de Madrid, España)

²Universidad de Castilla-La Mancha – ITct – Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones, Campus Universitario, s/n, Cuenca (Cuenca, España)

RESUMEN

El proceso de tasación de un instrumento de cuerda es una tarea compleja que contempla aspectos como la época en la que fue diseñado o el luthier que lo fabricó. Fuera de este proceso queda el análisis sonoro del instrumento que se reduce a valoraciones personales del perito experto.

En este trabajo se pretende abordar la posibilidad de evaluar un instrumento de cuerda, en concreto un violín, a partir de su análisis vibratorio midiendo la aceleración sobre la tapa superior del violín y sus características físicas para poder deducir su precio final en el mercado basado en técnicas de Machine Learning.

ABSTRACT

The appraisal process for a stringed instrument is a complex task that includes aspects such as the period in which it was designed or the luthier who made it. The sound analysis of the instrument is left out of this process, which is reduced to the personal assessments of the expert valuator.

This paper aims to address the possibility of evaluating a stringed instrument, specifically a violin, from its vibratory analysis by measuring the acceleration on the top of the violin and its physical characteristics in order to deduce its final price in the market based on Machine Learning techniques.

Palabras Clave— violín, aceleración, machine learning

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en el proceso de tasación de un instrumento musical de cuerda los peritos expertos tratan de responder a preguntas como ¿de qué material está hecho el instrumento?,

¿cuál es su procedencia?, ¿qué casa de luthieres lo fabricó? o ¿es su estructura original? Sin embargo, en el proceso de tasación no suelen estudiar, de forma objetiva, el sonido que produce ese instrumento en concreto.

Esta es la principal motivación para realizar un estudio de diferentes instrumentos musicales de cuerda, violines en particular, para poder clasificarlos atendiendo a la información física que se puede extraer de ellos de una manera sencilla y directa.

La catalogación que se ha realizado atiende a una serie de características que permiten identificar la clase a la cual pertenece cada uno de los violines estudiados, teniendo cada una de las clases un rango de precios diferente.

Esta clasificación comienza con el estudio de las características que influyen directamente en la calidad sonora del violín, como son las piezas que lo forman y la relevancia en cada parte del sistema acústico que este genera.

Tras esta primera recolección de datos sobre el violín, se continua con la colocación de un acelerómetro en la tapa del violín para medir de forma objetiva el comportamiento vibratorio del instrumento cuando se tocan al aire cada una de sus cuatro cuerdas [1-4].

Tras la recolección de toda esta información, se genera una base de datos para poder predecir el rango o la clase a la que pertenece el instrumento con herramientas de *machine learning*.

Con todos estos datos, se podrá predecir una clasificación que ayudará a poner precio en futuras tasaciones a los peritos expertos.

* **Autor de contacto:** i.villa@alumnos.urjc.es

Copyright: ©2023 Isabel Villa et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. VARIABLES FÍSICAS DEL VIOLÍN

Antes de comenzar con el estudio del instrumento, es necesario conocer más sobre su construcción. Para ello, se contactó con Pedro Ruiz del Árbol, un luthier que realiza su trabajo en la localidad madrileña de Morzarzal. Con su ayuda, seleccionamos algunas de las características físicas que nos darán información relevante para diferenciar violines entre sí, obteniendo de esta manera una idea general de cada instrumento con una recogida de datos sencilla.

Las características físicas del violín seleccionadas son las siguientes: altura del cuerpo de la caja, anchura superior de la caja, anchura inferior de la caja, anchura de la cintura de la caja, largo y ancho de la abertura de la efe (ver Figura 1). Estas dimensiones nos ayudan a conocer el volumen de aire relativo de cada uno de los violines, además de conocer la capacidad de transmisión aérea del instrumento hacia el exterior gracias a las efes.



Figura 1. Dimensiones físicas del violín registradas para su clasificación.

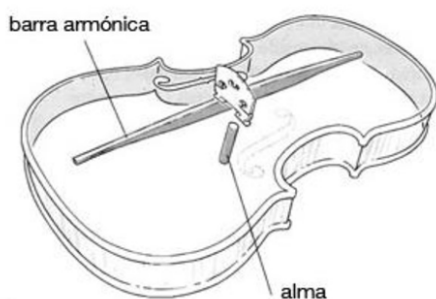


Figura 2. Colocación del alma en el interior de la caja del violín [5].

Además, también se recogieron dimensiones de algunas piezas que tienen relevancia en la acústica del violín como la anchura del diapasón, la altura y profundidad del puente o la colocación del alma del violín (ver Figura 2). Esto es debido a la relación entre los diferentes grosores y su capacidad para transmitir vibración a través del instrumento. Además, la colocación del alma influye, de forma directa, con el sonido final del instrumento.

Por último, se recopiló información relativa a las cuerdas utilizadas, ya que son las principales involucradas en la vibración del instrumento, así como el precio del violín en el mercado.

3. ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL VIBRATORIA

3.1. Instrumentación y configuración

Para realizar las medidas de vibración sobre los violines se ha utilizado un acelerómetro conectado a un analizador de vibraciones para poder monitorizar la señal vibratoria en tiempo real mientras se realizaba la medida.

El acelerómetro utilizado es un piezoeléctrico ICP de la marca PCB, modelo 352C33, con una sensibilidad de 100 mV/g [6]. Para recopilar la información relativa a la vibración de los violines se ha utilizado un analizador Soundbook con el software de adquisición de datos Samurai.

Para realizar las medidas, se seleccionó el rango de frecuencia desde 20 Hz a 20.000 Hz, se realizó un análisis en 1/3 de octava cada 0.02 s y un análisis FFT en el que se registró una muestra por cada 6.25 Hz cada 0.04 s.

3.2. Procedimiento del ensayo de medida de vibración

El acelerómetro se situó en la tapa superior del violín, entre el puente y el cordal y centrado bajo las cuerdas. Esto es debido a que este es el punto de mayor vibración del instrumento. En este punto en concreto confluyen las transmisiones de vibración de las cuerdas al puente, de aquí a las tapas a través de la barra armónica y el alma. El esquema del ensayo de vibración puede verse en la Figura 3.

Para fijar el acelerómetro a la tapa del violín se usó cera de abeja como adhesivo porque no deja residuo ni daña el barniz de los violines tras la realización de las medidas. Además, su uso es muy sencillo, con poca cantidad aplicada en la tapa inferior del acelerómetro y una vez situado en la posición de medida solo hay que presionar unos segundos para que el acelerómetro quede fijado. En la Figura 4 se puede ver la colocación final del acelerómetro fijado con cera de abeja.

Con el fin de evitar que de un ensayo a otro se alteraran resultados en las mediciones de vibración, se tomaron una serie de precauciones:

- Todas las medidas se realizaron con el mismo intérprete para que tanto la manera de sujetar el violín como la técnica aplicada para tocar las diferentes cuerdas no se viera influenciadas en ninguno de los ensayos.

- Se utilizó el mismo arco en todas las mediciones.
- Se colocó la misma almohadilla bajo el violín en cada ensayo.
- En el caso de que se registrara algún efecto no deseado del arco sobre la cuerda o cualquier otro evento involuntario y aleatorio que perjudicara la recogida de muestras limpias, las medidas se repitieron.
- Los violines siempre fueron afinados antes de la realización de las mediciones, siguiendo el estándar $La_4=440$ Hz.

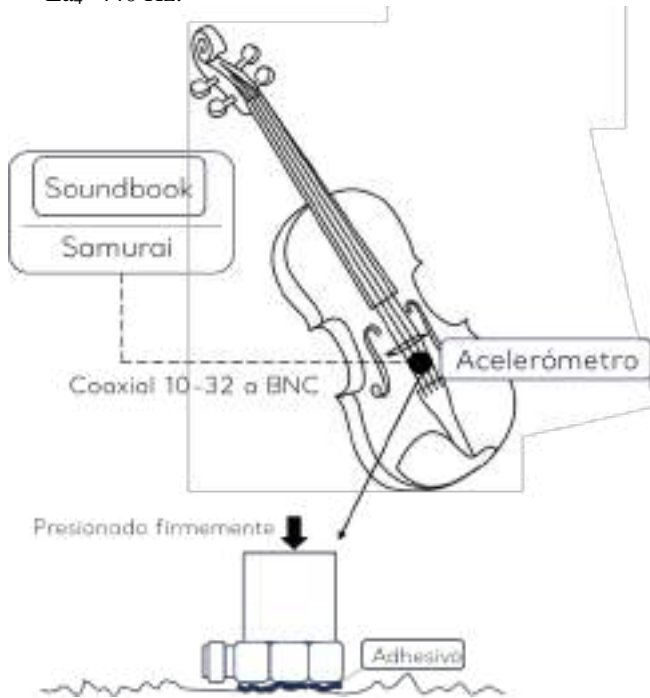


Figura 3. Esquema del ensayo de vibración.



Figura 4. Colocación del acelerómetro en el violín.

Una vez afinado el violín, colocado y conectado el acelerómetro sobre la tapa del violín y configurado el equipo analizador, se realizaron las diferentes mediciones. Las notas seleccionadas para el estudio son las cuerdas al aire del violín: Sol₃, Re₄, La₄ y Mi₅ cuyas frecuencias

fundamentales son 195 Hz, 293.6 Hz, 440 Hz y 659.3 Hz respectivamente. De cada una de las cuerdas se registraron las medidas que fueron necesarias hasta que se obtuvo una muestra limpia. En la Figura 5 puede verse el montaje real de las mediciones.



Figura 5. Ensayo de medición de la señal vibratoria de un violín.

En total se realizaron mediciones de 19 violines diferentes. De los 19 violines medidos, 5 fueron prestados por el luthier Pedro Ruiz del Árbol, construidos durante el 2018, y el resto fueron prestados por miembros de la Orquesta de la Universidad de Alcalá de Henares.

Los precios de los violines recopilados oscilan en el mercado entre los 300€ y los 15000€ Para la clasificación con *machine learning*, se dividieron los violines en tres clases finales dependiendo de su precio: baja, media y alta. Esta clasificación se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de los violines en clases según su precio.

		Clase		
		Baja	Media	Alta
Violines	Violín 8 300€	Violín 16 1200€	Violín 9 4000€	
	Violín 7 500€	Violín 11 1200€	Violín 14 10000€	
	Violín 10 500€	Violín 1 1300€	Violín 18 12000€	
	Violín 5 800€	Violín 4 1300€	Violín 13 15000€	
	Violín 17 800€	Violín 3 2000€		
	Violín 19 1000€	Violín 6 2000€		
	Violín 15 1000€	Violín 2 3000€		
		Violín 12 3000€		

4. PROCESADO DE LAS MEDICIONES DE VIBRACIÓN

4.1. Estudio preliminar

En primer lugar, se seleccionaron 6 violines, dos de cada clase descrita en la Tabla 1, para realizar un estudio de comportamientos y patrones entre las medidas. Los violines seleccionados fueron los números 7 y 14 para la representación de la clase baja, los números 2 y 6 para la calidad media y los violines número 13 y número 19 para la calidad alta.

Con esta primera selección se pudieron comparar los resultados obtenidos del cálculo de la FFT de las medidas de aceleración para cada uno de los violines en dB para todas las cuerdas al aire. En la Figura 6 se puede ver la comparación de los seis violines cuando se toca la nota La₄.

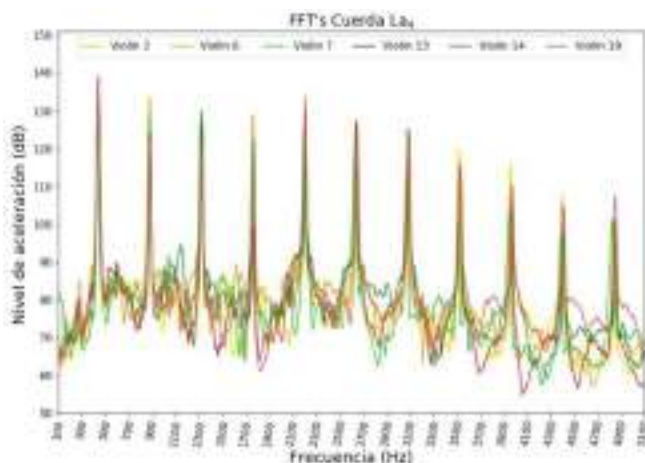


Figura 6. Comparación del nivel de aceleración analizado con FFT de la nota La₄ de los seis violines seleccionados.

En un análisis preliminar, se puede observar que tanto el nivel de aceleración en dB de la frecuencia fundamental, así como en cada uno de los armónicos, es diferente en cada uno de los violines ya que esta es la principal característica que diferencia unos violines de otros. Por este motivo, para poder comparar de forma estadística estos resultados, se evaluó la media y la mediana de todas las mediciones de aceleración realizadas en cada una de las cuerdas de cada violín. Tanto la media como la mediana de las muestras por cada nota siguen un patrón muy similar con la excepción de los resultados obtenidos en los picos de los armónicos, donde se observan resultados de la media inferiores a la mediana en varias ocasiones para todas las cuerdas. Un ejemplo de este análisis se puede ver en la Figura 7.

Con estos resultados preliminares, llegamos a las siguientes conclusiones: en primer lugar, la frecuencia fundamental no es siempre la que mayor nivel de aceleración presenta respecto a sus armónicos, los armónicos de cada violín en la misma cuerda tienen diferentes respuestas y, cuando evaluamos la media y la

mediana, podemos observar grandes diferencias entre los niveles de aceleración de la FFT en dB en cada uno de los armónicos que son distintos en cada uno de los violines.

Tras estas observaciones, la búsqueda se centró en la característica representativa de la señal vibratoria en el nivel de aceleración de las diferentes frecuencias de resonancia del instrumento. Esta señal resultó ser el porcentaje de la diferencia de niveles de aceleración de los principales armónicos con respecto a la frecuencia fundamental para cada una de las cuerdas de cada uno de los violines.

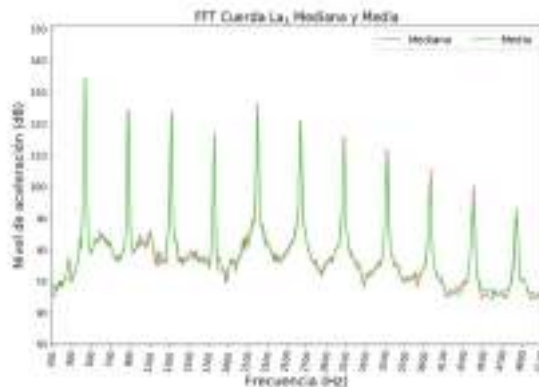


Figura 7. Comparación de la media y la mediana de la nota La₄.

4.2. Cálculo del porcentaje de diferencias

Calcular el porcentaje de la diferencia existente entre el nivel de aceleración de los armónicos y la frecuencia fundamental nos permite conocer la distribución energética en las frecuencias de resonancia de cada instrumento.

Para ello, hay que identificar la frecuencia fundamental y los armónicos de cada uno de los FFT de las cuerdas registradas. Después, para cada uno de los armónicos se ha calculado el porcentaje de la diferencia respecto al de la frecuencia fundamental.

Para evaluar los resultados, se ha representado con un valor negativo los resultados obtenidos del porcentaje de la diferencia cuando el valor del armónico es inferior al de la frecuencia fundamental y con un valor positivo en el caso contrario.

Las mayores diferencias las encontramos en las cuerdas graves del instrumento, Re₄ y Sol₃, donde las diferencias de los valores de los armónicos siempre son positivas respecto al nivel de aceleración de la frecuencia fundamental (ver Figura 8 para el caso particular de Re₄). Mientras que, en las cuerdas agudas, La₄ y Mi₅, donde los armónicos muestran un comportamiento generalmente constante respecto al nivel de la vibración de la frecuencia fundamental exceptuando casos aislados poco relevantes (ver Figura 9 para el caso de Mi₅).

Como representación de la señal vibratoria para el diseño de la base de datos, se recopiló el porcentaje de la diferencia de los primeros 10 armónicos con respecto a la frecuencia fundamental.



Figura 8. Porcentaje de la diferencia de nivel en armónicos de la cuerda Re₄.

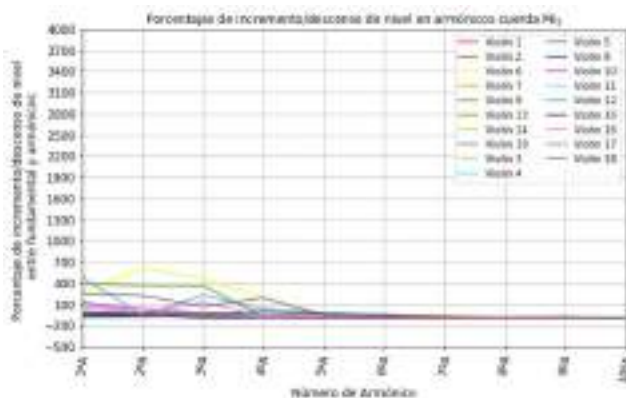


Figura 9. Porcentaje de la diferencia de nivel en armónicos de la cuerda Mi₅.

5. ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN DE MACHINE LEARNING

5.1. Definición de la base de datos

El conjunto de los datos de entrada, X, está formado por una matriz que contiene todas las características que hemos recopilado de los violines. Estas características son las 12 características físicas del instrumento y las 10 características representativas de la vibración del violín. Esto hace un total de 22 características: marca de las cuerdas, espesor del diapasón, espesor y altura del puente, ancho superior y ancho inferior de la caja, ancho de la cintura de la caja, altura de la caja, ancho y largo de la efe, posición horizontal y vertical del alma y las diferencias de los 10 armónicos seleccionados. Como se midieron 19 violines y se han evaluado 4 notas en cada uno de ellos, en total tenemos 76 mediciones en el conjunto de muestras.

El conjunto de datos de salida, Y, está formado por la matriz que contiene una sola columna, con la clasificación que se le

puede asignar a cada instrumento siendo esta “alta”, “media” o “baja”.

5.2. Selección de los algoritmos

Para poner a prueba la base de datos creada con los datos de los violines se han seleccionado dos algoritmos de clasificación debido a que la exploración de los datos es sencilla y se puede valorar la importancia de las características, son algoritmos simples y fáciles de interpretar, se adaptan a los objetivos propuestos y se obtiene un mejor ajuste cuando la base de datos es pequeña, como es nuestro caso.

Estos algoritmos, incluidos en la biblioteca *Scikit-learn* [7] de *machine learning* para Python, son:

- “Logistic Regression Classifier” que nos permite estimar la probabilidad de una variable cualitativa, en nuestro caso “alta”, “media” o “baja”, en función de variables cuantitativas, en nuestro caso “espesor del puente” o “ancho del diapasón”. Nos permite realizar una asignación final en función de probabilidades predichas [8].
- “Decision Tree Classifier” consigue, mediante el análisis de datos y sus salidas, decidir la mejor forma de realizar las diferentes decisiones, consiguiendo de esta manera una predicción con mayor probabilidad de acierto [9].

5.3. Preparación de la configuración de los algoritmos

El conjunto de datos de entrada, todos numéricos, cuenta con la separación de los datos en diferentes subconjuntos de prueba (test) o de entrenamiento (train) [7]. Se configuró para que el 70% de las muestras fuera al subconjunto de *train* y el 30% restante al subconjunto de *test*. Para asegurar que se tenga suficiente información de cada una de las clases, es necesario elevar el porcentaje de entrenamiento para aumentar las probabilidades de que el algoritmo aprenda de las tres clases definidas ya que, en nuestro caso, la clase “Alta” cuenta con pocas muestras.

5.4. Selección definitiva de las características

Para solventar el desequilibrio de la base de datos debido al elevado número de características que queríamos evaluar en comparación con el número de muestras, se redujeron las 22 características en 9: espesor del diapasón, espesor del puente, ancho inferior de la caja, altura del puente, ancho superior de la caja, largo de la efe, y las diferencias de nivel de los primeros cinco armónicos con respecto a la frecuencia fundamental.

Esta reducción del número de características se hizo gracias a la herramienta [9] que nos ayudó a conocer qué características no son prioritarias para el modelo cuando va a tomar una decisión y, por tanto, debían quedar fuera. De esta manera, reducimos un posible sobreajuste, mejoramos la

precisión del algoritmo al estar la base de datos mejor balanceada en cuanto al número de muestras frente al número de características reduciendo así el tiempo de entrenamiento.

6. RESULTADOS

Una vez finalizadas las etapas de definición y de ajuste de la base de datos, se procede a probar su efectividad con los dos algoritmos seleccionados, obteniendo en las métricas evaluadas una variabilidad elevada. Esto es debido a la falta de muestras de la clase “alta” en la base de datos que provoca que el modelo quede desajustado en la definición de la clasificación.

Para garantizar la independencia de las muestras y controlar esa variabilidad, utilizamos validación cruzada para estimar el resultado final de la eficacia del algoritmo para cada una de las bases de datos que se han propuesto. Así, probamos el modelo bajo el mayor número de circunstancias posibles [7]. El resultado obtenido con esta herramienta fue que, a pesar de que la base de datos es limitada y queda desbalanceada por el número insuficiente de medidas o muestras en todas las clases, el algoritmo basado en árboles de decisión funciona bien en estos casos (ver Figura 10).

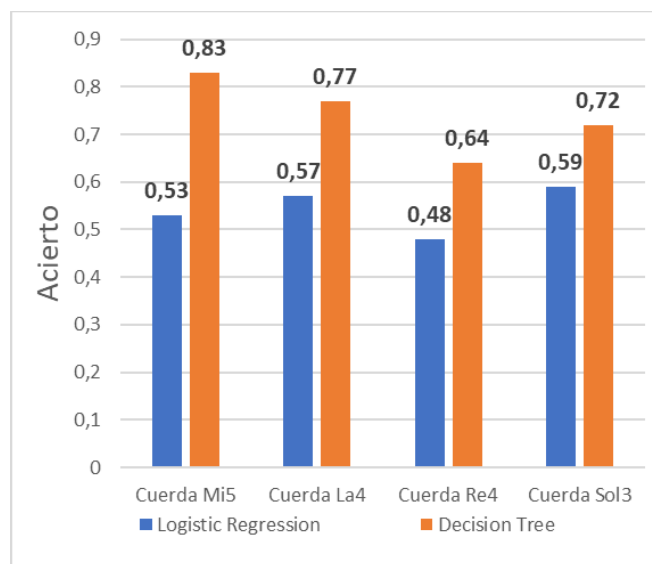


Figura 10. Resultados de acierto con la métrica *accuracy* con los diferentes modelos.

7. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el estudio de 19 violines con el objetivo de relacionar las características de los aspectos constructivos y las capacidades vibratorias del instrumento, propiedades necesarias e importantes para determinar la calidad del instrumento. Tras conocer las dimensiones físicas de cada uno de los violines, la marca de las cuerdas utilizadas, su precio en el mercado, realizar las medidas de vibración de las tapas de los violines con un acelerómetro y relacionar todas

estas características gracias a los algoritmos ofrecidos por *Scikit-Learn* de *machine learning* se ha llegado a la conclusión de que no existe un solo elemento en concreto que determine el precio del violín. También que no todas las características son determinantes, de hecho, de las 22 que se plantearon al inicio, solo han sido útiles 9 para el algoritmo.

Esto nos lleva a plantearnos que hay más variables que no han sido evaluadas como, por ejemplo, el volumen del violín, el diámetro del alma o el material de construcción, que podrían tenerse en cuenta en futuras actualizaciones del algoritmo.

Además, el número de violines estudiados, pese a tener una gran variedad de calidades, ha sido la principal limitación ya que no es fácil encontrar violines con una clasificación alta que ayuden a completar una base de datos más robusta en cuanto a muestras se refiere.

En cuanto a la extracción de características de las mediciones, el porcentaje de la diferencia del nivel de aceleración entre los armónicos y la frecuencia fundamental ha sido la elegida por no ser influenciada por agentes externos como el uso de diferente velocidad y presión del arco sobre las cuerdas, acción muy complicada de controlar.

Por todo esto, esta herramienta puede ser el inicio del cambio en la estimación o peritaje del precio de los violines teniendo en cuenta no sólo quién lo construyó, sino también las características físicas o la distribución frecuencial del sonido emitido.

8. REFERENCIAS

- [1] C. Manton. *Manual de medidas Acústicas y Control de Ruido*, MacGraw-Hill, Madrid, España, 1995
- [2] J. Allday, and S. Adams, *Advanced Physics*, Oxford, 2000.
- [3] J. Woodhouse. *The acoustics of the violin: a review*, IOP Science Vol.77, n11, 2014.
- [4] C. Raman, *On the mechanical theory of vibrations of bowed strings*. Bulletin of the Indian Association for the Cultivation of Science, 15: 1-158, 1918.
- [5] N. Berni Martín. Violín-Barcelona. Obtenido de <http://violin-barcelona.blogspot.com/2012/05/terminología.html>
- [6] PCB *Piezotronics*. Obtenido de <https://www.pcb.com/products?m=352C33>
- [7] "Scikit-Learn Preprocessing-OneHotEncoder". Obtenido de <https://lc.cx/z5GvFN>
- [8] G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani. *An introduction to Statistical Learning*, Springer, New York, EEUU, 2023.
- [9] Aprende Machine Learning. Obtenido de <https://lc.cx/dgmkOp>

ON THE RADIATION FROM UNBAFFLED PISTONS AND THEIR DIPOLE EQUIVALENT

Filipe Soares^{1*}, Vincent Debut^{2,3}

¹ Instituto Superior Técnico, Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, Lisboa, Portugal

² Instituto de Etnomusicologia, Centro de Estudos em Música e Dança, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal

³ Instituto Politécnico de Castelo Branco - Escola Superior de Artes Aplicadas, Castelo Branco, Portugal

ABSTRACT

The radiation efficiency from simple vibrating planar surfaces is often used as a basis to describe the sound radiation from more complex structures, having important applications in various fields of acoustics. The low-frequency radiative behavior of a baffled piston can easily be represented by a simple monopole source. Notably, the equivalent source strength is dependent on the piston surface area. However, the un baffled case presents additional difficulties as the “edge effects” significantly alter the piston radiation impedance. Consequently, a low-frequency equivalence between dipoles and an un baffled pistons is not as straight forward, since not only the piston area but also its shape will have an effect on the radiated sound. In this work, the search for a simple (and relatively generic) equivalence between dipoles and un baffled pistons is pursued. A finite element model is used to calculate the radiation efficiency from un baffled pistons of different shapes. Results indicate that the “edge effects” can be accurately represented by a simple term dependent on the piston compactness (ratio of area to perimeter). Effectively, pistons with smaller area to perimeter ratio will be less efficient radiators. Such term allows the definition of an equivalent dipole source strength that approximates the low-frequency behavior of an un baffled piston of arbitrary shape.

Keywords: Acoustic radiation, dipoles, un baffled, planar radiators, radiation efficiency.

1. INTRODUCTION

Un baffled pistons of any shape, vibrating at a frequency ω , will radiate approximately as dipoles when the wavelength λ is much larger than a characteristic dimension of the piston a [1]. The same analogy can be made with respect to baffled pistons and monopoles. At low-frequencies, the equivalent

monopole source strength representing a baffled piston is dependent on the piston area S . However, the overall shape of the piston has no influence on the amount of radiated power. Hence, representing the low-frequency radiative behavior of a baffled piston (of any shape) using a monopole becomes a fairly straight forward task.

Attempting to define an equivalence between a dipole and an un baffled piston is, however, not as trivial. Difficulties arise because the same independence on the piston shape does not hold for the case of an un baffled piston. That is, pistons with the same surface area S but different shapes will not radiate the same amount of acoustic power. This is related to the effects along the piston edges, which present large tangential velocities and significantly influence the force applied on the fluid by the vibrating piston [2]. In this study we explore how the shape of an un baffled piston can influence its radiation efficiency.

1.1 The monopole

A monopole source, with harmonically varying source strength $q(t) = \text{Re}(Qe^{i\omega t})$, generates a pressure field given by [1]

$$p(r, t) = \frac{Q}{4\pi r} e^{i(\omega t - kr)} \quad (1)$$

where $k = \omega / c$, c is the speed of sound and r is the distance between the monopole and the observation point. The total radiated sound power is given by

$$\Pi = \left(\frac{1}{\rho c} \right) \frac{|Q|^2}{8\pi} \quad (2)$$

*Filipe Soares: filipedcsoares@gmail.com

Copyright: ©2023 Soares et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

where ρ is the fluid density. If we consider a baffled piston of area S , vibrating vertically with velocity $u(t) = Ue^{i\omega t}$, the equivalent monopole strength is given simply by

$$Q = i\omega\rho S U \quad (3)$$

The radiated power of such piston is then given by

$$\Pi = 2 \left(\frac{1}{\rho c} \right) \frac{|Q|^2}{8\pi} = \frac{k^2 \rho c S^2 U^2}{4\pi} \quad (4)$$

where a factor of 2 is considered to account for the effect of the baffle. At low frequencies, its radiation efficiency (normalized radiated power) is given by [1]

$$\sigma = \frac{\Pi}{\rho c S U^2} = \frac{k^2 S}{4\pi} \quad (5)$$

A baffled piston at low-frequencies, like a monopole source, radiates sound by forcing an unsteady volume outflow from a region that is very small compared to the wavelength. Any vibrating body undergoing a change in volume (e.g. pulsating bubble, baffled loudspeaker, etc.) falls within this category. Consequently, the shape of a baffled piston does not influence its total radiated power, and its radiation efficiency is dependent solely on the surface area S and frequency k .

1.2 The dipole

Similarly, a dipole radiating harmonically generates a pressure field given by [1]

$$p(r, \theta, t) = \frac{ik}{4\pi r} \cos \theta \left(1 + \frac{1}{ikr} \right) F e^{i(\omega t - kr)} \quad (6)$$

where θ is the elevation angle and the source strength here is $f(t) = F e^{i\omega t}$ and represents a point force. Unlike the cases of the monopole and baffled pistons, a dipole produces no net volume outflow. However, it exerts a force $f(t)$ on the surrounding fluid. A rigid sphere or planar surface oscillating in free space will behave as a dipole when their characteristic dimensions are small compared to the wavelength. The total sound power radiated by this dipole is given by

$$\Pi = \left(\frac{1}{\rho c} \right) \frac{k^2 |F|^2}{24\pi} \quad (7)$$

1.2.1 Dipole as a superposition of monopoles

A dipole can also be described by a pair of nearby monopoles radiating in phase opposition, separated by a small distance d . In this analogy, the pair of monopoles is equivalent to a dipole source provided that $d \ll \lambda$ and the following equivalence between the dipole and monopole strengths can be made

$$f(t) = Q d e^{i\omega t} \Leftrightarrow F = Q d \quad (8)$$

Similar to the above analogy between monopoles and baffled pistons, an unbaffled piston will radiate as a dipole. The radiated power is given by

$$\Pi = \left(\frac{1}{\rho c} \right) \frac{k^2 |Q d|^2}{24\pi} = \left(\frac{k^4 \rho c S^2 U^2}{24\pi} \right) d^2 \quad (9)$$

while the radiation efficiency is

$$\sigma_{\text{dip}} = \left(\frac{k^4 S}{24\pi} \right) d^2 \quad (10)$$

Notice how radiation efficiency of the unbaffled case depends on k^4 compared to the baffled case k^2 , i.e. the presence of the baffle will increase the radiation efficiency of a vibrating piston, particularly at low frequencies. More importantly however, unlike the case of the baffled piston, the shape of the piston will have an important effect on its radiation efficiency. In the analogy to the pair of monopoles, the “edge effects” are represented here by the distance d , whose physical significance when dealing with real systems (with characteristic dimensions) is not evident. The equivalence of this distance d for the case of physical systems, is not straight forward, particularly since very few analytical examples provide a basis for comparison. Nevertheless, a known example is that of a vibrating sphere [1] of radius a which, at low frequencies, radiates as a dipole whose equivalent distance is $d = 2a$. Another example is that of a rigid disk oscillating in free-space [3], which gives an equivalent distance $d = (8/3\pi)a$. Explicit expressions for these two examples are given in the appendix.

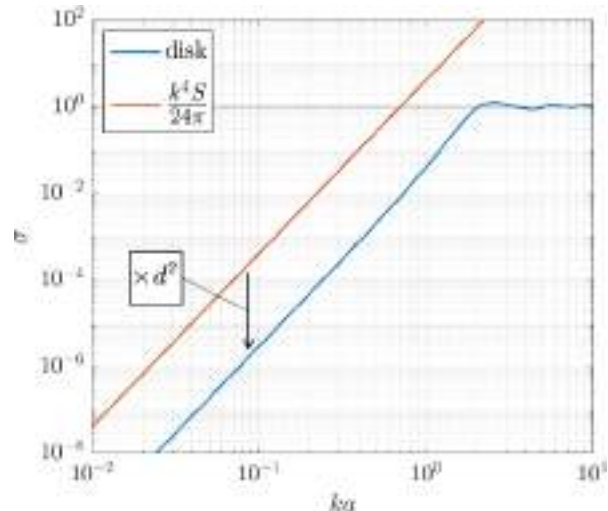


Figure 1. Radiation efficiency by a rigid disk of radius a oscillating in free-space (blue) and a low-frequency approximation using a dipole source equivalence (red). The role of the parameter d is highlighted.

The main goal of this study is to provide a simple way to describe the radiation efficiency of an un baffled piston of arbitrary shape using a point dipole. This aim can be summarised as finding an equivalent distance d , dependent on the piston geometry, that allows a reasonable approximation of the radiation efficiency at low-frequencies. To graphically illustrate the effect of the distance d , Figure 1 shows the radiation efficiency of a disk in free-space alongside the low-frequency approximation based on the dipole expression (10).

To this aim, a finite-element model was used to calculate the radiation efficiency of un baffled pistons of various shapes. Based on the obtained results, we derive a generic expression for the equivalent distance d , dependent on the compactness (ratio of area to perimeter) of the planar surface, which provides accurate approximations for the radiation efficiency of un baffled pistons of arbitrary shape.

2. NUMERICAL MODEL

The conducted numerical experiments aimed at calculating the radiated power and radiation efficiency of pistons with the same surface area S but different perimeters, in an attempt to characterise/quantify the “edge effects”. Three distinct shapes, illustrated in Figure 2, were considered: a rectangle, an isosceles triangle and an ellipse. In this way, similar shapes with different ratios of area to perimeter were calculated. Note that in all three cases, a maximum in the area/perimeter ratio is reached when the aspect ratio equals one ($a/b = 1$), leading to a square, an equilateral triangle and a circle, respectively.

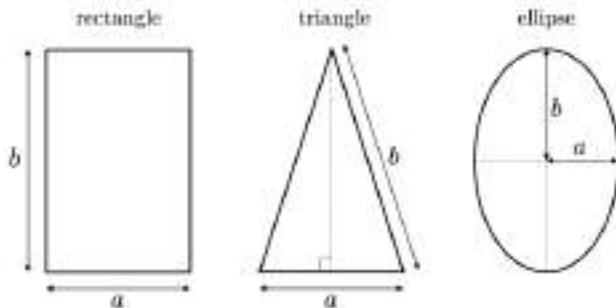


Figure 2. Three piston shapes considered in this study.

The used finite element model is illustrated in Figure 3. It consisted of a spherical domain with the un baffled piston located at the centre of the sphere. A perfectly matched layer is placed in the outer surface of the sphere to simulate anechoic conditions. Note that the spherical domain can be reduced to a quarter of a hemisphere (one eighth of the sphere) by considering the symmetric properties of the problem. Firstly, by the nature of the un baffled problem, the plane in which the piston is placed will have zero pressure (sound waves in each side cancel out), hence only the upper hemisphere is considered (the pressure in the lower

hemisphere will be the same, with opposite sign). Furthermore, the rectangle and ellipse have a two symmetry lines, hence, symmetric boundary conditions are imposed and only one quarter of the hemisphere needs to be considered. For the triangle, which has only one symmetry line, half the hemisphere needs to be considered. The model solve the Helmholtz equation and relies on forcing the piston surface to oscillate vertically at a given velocity (taken as $U = 1$ m/s) and frequency k , and then calculating the total radiated sound power Π via integration over the entire spherical outer surface. Subsequently, the radiation efficiency is given simply by $\sigma = \Pi / \rho c S U^2$.

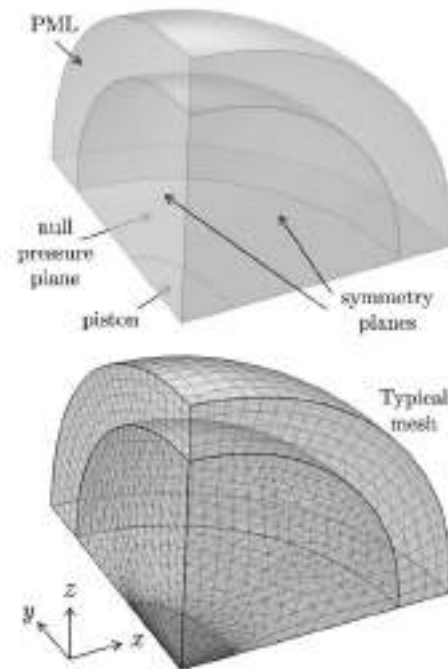


Figure 3. Illustration of the used FE model.

3. RESULTS: RADIATION EFFICIENCY OF UNBAFFLED PISTONS OF VARIOUS SHAPES

In the search for an equivalent dipole formulation of an un baffled piston we are naturally interested in the low-frequency behaviour only, i.e. $ka < 1$. The dipole point source cannot, by default, reproduce the radiative behaviour when the wavelength is comparable with the dimensions of the piston (the dipole does not have a characteristic dimension). We proceeded with numerical simulations for all piston shapes (with the same surface area S) at a single low-frequency, fixed at $kl = 0.01$, where l was defined as $l = \sqrt{S/\pi}$ (Note: this definition is equivalent to say $l = a$ for the case of a circular piston). Figure 4 shows the radiation efficiency at $kl = 0.01$ for the three base shapes with different aspect ratios a/b .

The results in Figure 4 illustrate how pistons with the same surface area and different shapes can have very different radiative capacity. Firstly, we note that the radiation efficiency tends to zero at the limiting cases: $a/b \rightarrow 0$, $a/b \rightarrow \infty$ and $a/b \rightarrow 2$ for the triangle. This seems physically plausible since an infinite “string” will radiate no sound. Secondly, for all three cases, the maximum in radiation efficiency occurs at $a/b = 1$. Note that it is at this point ($a/b = 1$) that the perimeter of each shape is minimum.

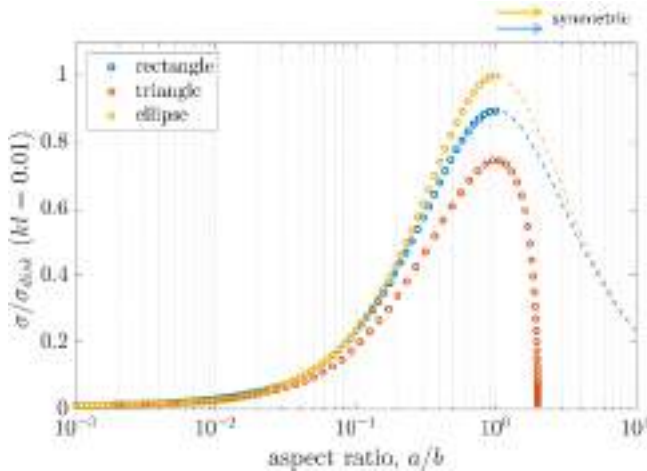


Figure 4. Radiation efficiency at low-frequency $kl = 0.01$ as a function of the aspect ratio for the three base shapes (rectangle, triangle and ellipse). Note: the radiation efficiency was normalized by that of a rigid disk in free-space (see appendix A.1).

Another important observation is that all shapes have different values for the maximum of σ . Notably, the circle is the most efficient, followed by the square and lastly the equilateral triangle. These results strongly suggest that the “compactness” (ratio of area to perimeter S/P) is an important parameter in defining the radiation efficiency. This is illustrated clearly in Figure 5, where the compactness parameter S/P of all shapes is plotted as a function of the aspect ratio. Perhaps not so surprisingly, this relation is almost identical to the plot shown in Figure 4. Notice also how this parameter also has units of meters, much like the equivalent distance d . Analytical expressions for the areas, perimeters and their ratio for all three shapes are presented in the appendix.

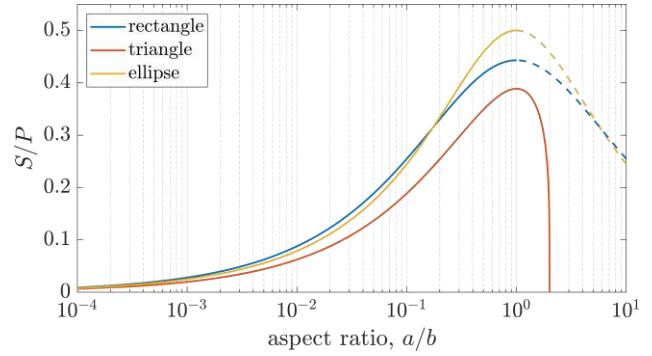


Figure 5. Variation of the area to perimeter ratio as a function of the aspect ratio for all three shapes. In these results, the surface area was fixed for all cases at $S = \pi$.

4. A GENERIC APPROXIMATION OF THE EQUIVALENT DISTANCE

We now present the same results in a different perspective. Firstly, instead of underlining the role of the aspect ratio a/b , we plot the results in terms of the compactness (ratio of area to perimeter S/P). Notice however that the ratio S/P is not independent of scale and, in our simulations, both dimensions a and b were modified to ensure a constant surface area S . Then, a more pertinent parameter is the normalized compactness S/Pb , which is dimensionless and depends solely on the aspect ratio and the type of shape (see the expressions in the appendix, which highlight the appearance of this dimensionless parameter). Secondly, we normalize the radiation efficiency results to that of the dipole $s_0 = k^4 S / 24\pi$, to emphasize how the equivalent distance d can be retrieved, that is

$$\sigma_{FE} = \sigma_{dip} = s_0 d^2 = \left(\frac{k^4 S}{24\pi} \right) d^2 \Leftrightarrow d = \sqrt{\frac{\sigma_{FE}}{s_0}} \quad (11)$$

Once again, the distance d is not independent of scale and a more generic representation is given when normalized by a characteristic dimension of the piston $d^* = d/b$.

Figure 6 shows the influence of the piston compactness on its radiation efficiency (represented here by the dimensionless equivalent distance d^*). Results in the two plots are the same: the top-plot has linear y-axis while the bottom-plot has logarithmic y-axis. From Figure 6 there is no doubt that the compactness of the piston is directly related to the equivalent distance d . Considering this parameter, the numerical results for all three cases collapse almost perfectly. Taking the pivot point (known result for the disk, $d^* = 8/3\pi$) we can easily fit the numerical results by

$$d = \frac{16}{3\pi} \left(\frac{S}{P} \right) \approx 1.7 \left(\frac{S}{P} \right) \quad (12)$$

This curve is shown in Figure 6 as a dotted black line. Note that this expression is exact for the case of the disk and fits almost perfectly (error <3%) to the numerical results of the ellipse. Slight deviations are seen compared to the rectangle, but these are no larger than < 6% for rectangles with reasonable aspect ratios $0.1 < a^* < 10$.

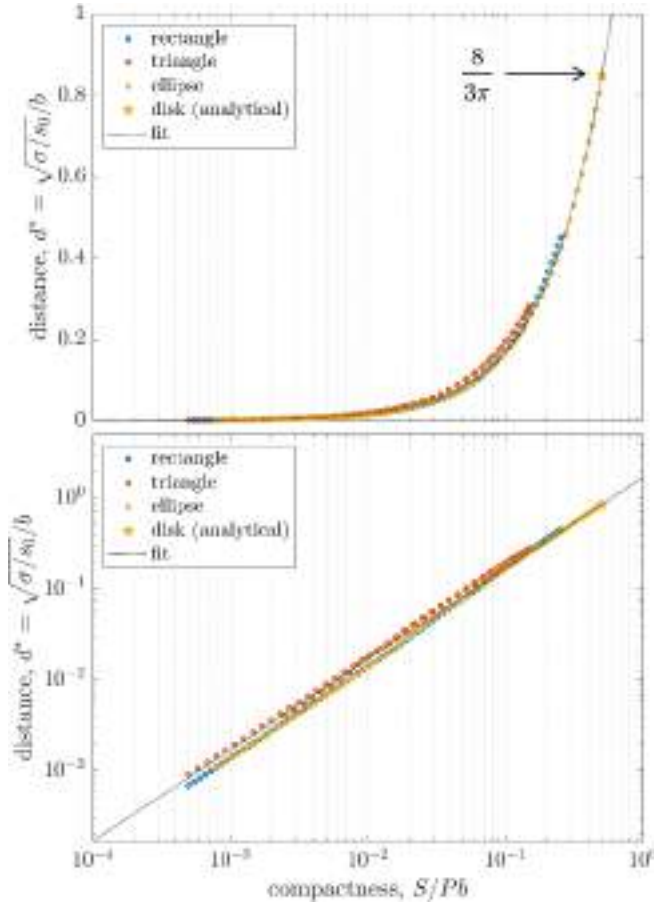


Figure 6. Influence of the piston (dimensionless) compactness S/Pb on the radiation efficiency (here represented by the equivalent dimensionless distance $d^* = d/b$). The two plots show the same results with either a linear (top) and logarithmic (bottom) scale for the y-axis. Results for all three shapes collapse in terms of the compactness parameter S/Pb .

5. CONCLUSIONS

The radiation efficiency of an un baffled piston with arbitrary shape was studied. Focus was given on providing a simple and generic formulation to allow a description of its low-frequency behavior using a point dipole. A 3D finite-element model allowed the calculation of the radiation efficiency of various simple shapes (ellipse, rectangle and triangle) at different aspect ratios. Numerical results strongly suggest that the piston compactness parameter (area to perimeter ratio) is

an excellent descriptor of the typical “edge effects” of un baffled configurations, as numerical results for all shapes collapse as a function of this parameter. Consequently, an expression for the source strength of an equivalent dipole, dependent on the compactness parameter, was provided. This allows for an accurate description of the low-frequency behavior of an un baffled piston of arbitrary shape, using a simple dipole formulation. The results presented here can be useful in the description of more complex un baffled structures (e.g. loudspeakers, vibrating plates, radiating elements in musical instruments, etc.), that are often difficult to calculate [4], in a very simple manner. Notably, this could serve as a basis for formulations relying on the use of a minimal number of elementary sources to describe the radiation from arbitrarily shaped plates, as done recently for the baffled case using circular pistons [5].

REFERENCES

- [1] A. Dowling, "Steady-state radiation from sources," in *Encyclopedia of Acoustics*, John Wiley & Sons, 1997, pp. 107-126.
- [2] P. Morse and K. Ingard, *Theoretical Acoustics*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [3] T. Mellow and L. Karkkainen, "On the sound field of an oscillating disk in a finite open and closed circular baffle," *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 1311-1325, 2005.
- [4] B. Laulagnet, "Sound radiation by a simply supported un baffled plate," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, no. 5, pp. 2451-2462, 1998.
- [5] A. C. Garcia, N. Dauchez and G. Lefebvre, "Modeling the acoustic radiation of plates using circular pistons," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 553, 2023.

APPENDICES

A.1 Radiation of an oscillating rigid disk in free-space

At low frequencies, the radiation impedance of a rigid disk in free-space is given by [3]

$$Z_r = 2\rho c S \left(\frac{8}{27\pi^2} (ka)^4 + i \frac{4}{3\pi} (ka) \right) \quad (13)$$

and the radiated power is retrieved by

$$\Pi = \frac{1}{2} \text{Re}(Z) U^2 = (ka)^4 \rho c S \left(\frac{8}{27\pi^2} \right) U^2 \quad (14)$$

Re-formulating this expression to emphasize its equivalence to the dipole leads to

$$\Pi = \frac{k^2 |Qd|^2}{\rho c 24\pi} = \frac{k^2 (\omega \rho S U)^2 \left(\frac{192}{27\pi^2} \right) a^2}{\rho c 24\pi} \quad (15)$$

Then the equivalent distance d becomes evident

$$d^2 = \frac{192}{27\pi^2} a^2 \Leftrightarrow d = \frac{8}{3\pi} a \quad (16)$$

The curious reader might note that the factor $8 / 3\pi$ is rather familiar. It appears also in the low-frequency reactance of a baffled circular piston [2]. The low-frequency radiation efficiency of a free-disk oscillating in free space is then given by

$$\sigma_{disk} = (ka)^4 \frac{1}{24} \left(\frac{8}{3\pi} \right)^2 \quad (17)$$

A.2 Radiation of an oscillating rigid sphere in free-space

The impedance of a rigid sphere vibrating in free-space is given by [1]

$$Z_R = \rho c \frac{2\pi a^2}{3} \left(\frac{ika(1+ika)}{1+ika - (ka)^2 / 2} \right) \quad (18)$$

and the radiated power is retrieved by

$$\Pi = \frac{1}{2} \text{Re}(Z)U^2 = \frac{\pi}{6} \rho c a^2 U^2 \left(\frac{(ka)^4}{1 + (ka)^4 / 4} \right) \quad (19)$$

with the associated low-frequency approximation

$$\Pi = \frac{\pi}{6} \rho c a^2 U^2 (ka)^4 \quad ka \ll 1 \quad (20)$$

In this case, the equivalent dipole would have a distance $d = 2a$.

A.3 Areas, perimeters and compactness of simple shapes

For a rectangle, the area, perimeter and their respective ratio is given by

$$\begin{aligned} S &= ab \quad ; \quad P = 2(a+b) \\ \frac{S}{P} &= \frac{b}{2} \left(\frac{a^*}{a^* + 1} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

where $a^* = a / b$.

For an isosceles triangle, the area, perimeter and their respectively ratio is given by

$$\begin{aligned} S &= \frac{a}{2} \sqrt{b^2 - \frac{a^2}{4}} \quad ; \quad P = 2b + a \\ \frac{S}{P} &= \frac{b}{4} \left(\frac{a^* \sqrt{1 - a^{*2} / 4}}{(1 + a^* / 2)} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

The perimeter of an ellipse has no exact formula. However, a good approximation is given by

$$\begin{aligned} S &= \pi ab \quad ; \\ P &= \pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right] \quad ; \\ \frac{S}{P} &= b \left(\frac{a^*}{3(a^*+1) - \sqrt{3a^{*2} + 10a^* + 3}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

FEM-BASED OPTIMAL DESIGN FOR THE TUNING OF *SIXXEN* INSTRUMENTS

Vincent Debut^{1,2}, Rui Borges Maia³, and Pedro Carneiro³

¹Instituto de Etnomusicologia, Centro de Estudos em Música e Dança, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal

²Instituto Politécnico de Castelo Branco – Escola de Artes Aplicadas, Castelo Branco, Portugal

³Orquestra de Câmara Portuguesa, Algès, Portugal

RESUMEN

Para su composición *Pléiades*, Iannis Xenakis imaginó un instrumento de percusión que se llama *Sixxen*. Inspirado en las sonoridades de la música da Indonesia, consta de una serie de 19 barras metálicas dispuestas según un sistema de afinación microtonal construido con intervalos musicales desiguales. Con motivo del centenario de Xenakis, el sexteto de percusión de la Orquesta de Cámara Portuguesa decidió interpretar esta composición, para la que se construyó específicamente un conjunto de seis *sixxen*. Los instrumentos diseñados se fabricaron con barras de aluminio de sección transversal en forma de U, utilizando dos geometrías diferentes. Para un perfil de barra determinado, la sintonización se logró mediante una metodología de dos pasos que incluía la actualización del modelo. Combina análisis modal 3D, técnicas de optimización y mediciones acústicas, y persigue la afinación del modo radiante dominante ajustando la longitud de la barra. Cada instrumento se afinó según una escala musical predefinida, construida con una estructura similar a una escala da Indonesia e incluyendo variaciones aleatorias. El método da lugar a instrumentos con desviaciones absolutas de afinación típicamente inferiores a 7 centésimas, es decir, inaudibles, lo que ilustra la eficacia de la metodología propuesta.

ABSTRACT

For his composition *Pléiades*, Iannis Xenakis imagined a metallophone instrument that is called *Sixxen*. Inspired by the sonorities of Indonesia music, it consists of a series of 19 metal bars arranged according to a microtonal tuning system built with uneven musical intervals. On the occasion of Xenakis' centenary, the percussion sextet from the Portuguese Chamber Orchestra decided to perform this composition, for which a set of six *sixxen* was built specifically. The designed instruments were made of aluminium bars with U-shape cross-section, using two different geometries. For a given bar profile, tuning was achieved in a two-step methodology including model updating. It combines 3D modal analysis, optimization techniques and acoustic measurements, and pursues the tuning of the dominant radiating mode by adjusting the

bar length. Each instrument was tuned according to a predefined musical scale, built with a similar structure to an Indonesian scale and including random variations. The method leads to *sixxen* instruments with absolute tuning deviations typically below 7 cents, that is inaudible, illustrating the efficiency of the proposed methodology.

Keywords: optimal tuning, Finite Element modelling, bar percussion instrument, Xenakis, music acoustic.

1. INTRODUCTION

Written for a percussion sextet by Iannis Xenakis in 1978-79, *Pléiades* stands as a major work of 20th century music. Placing percussion at the centre of contemporary musical exploration, the piece requires a set of *sixxen*, an unusual percussion instrument imagined by the composer that incorporates the essence of his musical concepts. As specified in the performance notes of the score (see Figure 1), Xenakis requested six percussion instruments made of 19 metal bars arranged according to a microtonal tuning system built with uneven musical intervals, and with subtle deviations in pitch among the set of instruments. With that said, Xenakis, however, remained vague regarding the building and specific musical features of these instruments and in this way, offered freedom to musicians and instrument makers in defining their musical attributes. This has resulted in a considerable number of different interpretations of the instruments, built with different elements regarding bar shape, material and components (resonator/pedal), and leading to musical performances with large variations in tuning and timbre [1].



Figure 1: Performance notes of *Pléiades*.

On the occasion of Xenakis' centenary, the percussion sextet from the Portuguese Chamber Orchestra decided to perform *Pléiades* and sought advice from the Musical Acoustics Laboratory of the Nova University for designing and tuning the six *sixxen*. Starting from readily commercially available metal bars, a tuning approach for the set of instruments was pursued. For a given

vincentdebut@fcsh.unl.pt

Copyright: © 2023. Vincent Debut et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

instrument, it aims at tuning the dominant radiating mode of each bar, following a musical scale based on precisely defined microtonal intervals. Since small detuning deviations must exist from one instrument to the next according to the composer, attention was paid to control the amount of musical beats produced when two instruments are played in unison. Inspired by studies dealing with the optimal design of bars in mallet percussion instruments [2–5], the tuning strategy combines finite element (FE) modal analysis and optimization techniques. Moreover, because of the inherent variations in geometry and material properties present in industrially manufactured products, a two-step strategy was devised including model updating based on acoustic measurements. The present paper describes the methodology developed, starting from the definition of the musical scales up to the realization of the instruments, and discuss the developed tuning approach.

2. SELECTION OF THE BAR PROFILE AND MATERIAL

Since the sound qualities produced by idiophones are strongly influenced by the geometry and material properties of the vibrating component, the first aspect to consider before attempting any tuning was to select the bars attributes, shape and material, to be optimized. This issue, which is crucial for the sounding outcome of the performance, was addressed by the artistic director (PC) and the instrument maker (RBM), based on informal listening tests. A set of commercially available aluminium bars with different profiles and geometries was tested by striking each bar, recording their sounds and comparing their perceived qualities from a musical point of view. No acoustical descriptor was used for guiding the selection and no attempt was made to understand what make attractive the sound produced. Starting from a number of eight bars, the selection process results in the choice of two types of aluminium bars (alloy 1050) with U-shape cross-section. One for the six lowest tones of the instruments, the other for the thirteen highest tones (see Figure 2). Figure 3 shows the spectrograms obtained from the sounds of the two selected profiles obtained by impact excitation close to their center. A quick look on both plots evidences two different frequency contents and respective time evolution. The spectrogram corresponding to the lower tones shows a long duration with a large number of inharmonic partials that all have a long decay while the sound of the higher tones is shorter and clearly less complex. This will result in timbral changes along the musical scale, accompanied by a clearer sensation of pitch for the high register tones.

3. DEFINITION OF THE MUSICAL SCALES

The instruments are tuned to the same set of notes, following an uneven microtonal scale but including slight deviations in pitch and interval size among the instruments in order to give a specific tone color to each *sixxen*. Following Xenakis' instruction, the reference scale is a non-octaviating scale, where no systematic musical patterns can be evidenced. Inspired by gamelan music, the reference 19-tone scale was calculated by algorithmic generation, based on extrapolation of a stretched *pelog* scale [6] and then compressing the entire new scale in order to fit within the predefined frequency range of the instruments, i.e. 92.48- and 932.32 Hz. The musical scales for the other five instruments were calculated by allowing small frequencies deviations around the frequencies of the reference scale, either positive or negative, that were generated by a random process. Attention was paid for avoiding crossing between the musical scales, meaning that when all instruments play

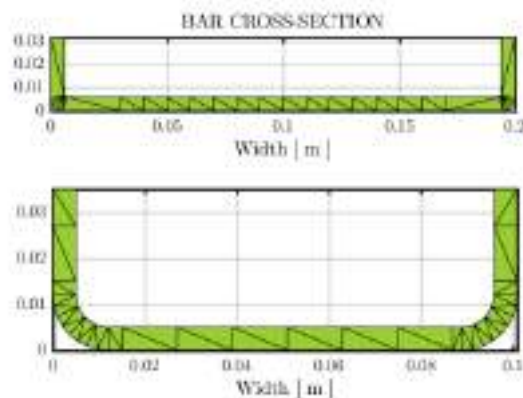


Figure 2: Cross section of the aluminium bars considered in this work for the lowest tones (top) and highest tones (bottom).

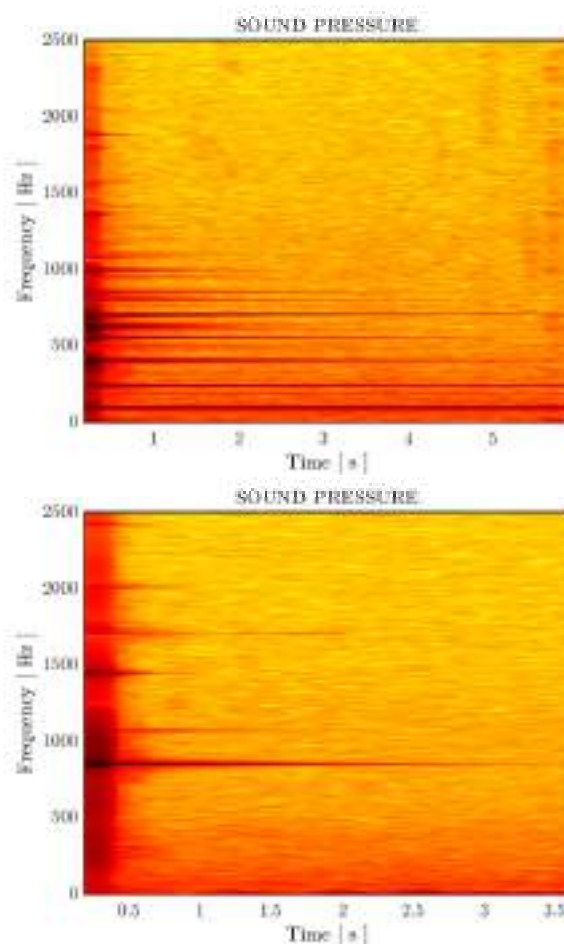


Figure 3: Spectrograms of the sound of the struck bars used for the low (top) and high registers (bottom).

the scales in unisson, the sounding scale is ascending. Moreover, the presence of sounding beats occurring when the same notes are played on different instruments was controlled. Based on informal listening tests, it was decided that the beating frequency must fall below 5 Hz, thus resulting in a range of pitch deviations of about 80 cents for the group of *sixxen*. To be specific, Table 1 presents the calculated tuning frequencies for the six instruments: these are the target frequencies for the following optimization of the bars.

Note #	<i>sixxen</i> 1	<i>sixxen</i> 2	<i>sixxen</i> 3	<i>sixxen</i> 4	<i>sixxen</i> 5	<i>sixxen</i> 6
1	92.499	94.488	94.677	91.935	90.305	90.887
2	108.968	108.466	109.845	110.402	111.253	111.269
3	113.715	114.342	111.402	116.000	115.021	111.755
4	124.073	124.667	125.247	126.271	126.015	126.362
5	148.748	147.089	148.374	146.688	146.512	150.456
6	163.396	161.525	161.556	162.283	161.737	162.741
7	198.293	196.529	198.659	197.419	197.898	198.795
8	208.352	210.360	206.611	207.395	206.082	207.981
9	230.299	231.509	229.208	232.187	232.248	229.612
10	282.586	281.270	281.362	280.946	280.815	284.451
11	313.624	312.751	311.914	315.282	312.986	314.170
12	387.568	388.901	385.278	388.574	386.054	386.804
13	408.881	410.739	409.710	410.231	407.132	406.734
14	455.386	457.675	456.820	454.798	454.776	456.220
15	566.177	564.134	567.004	568.165	566.982	563.950
16	631.944	630.918	631.236	632.765	630.367	633.325
17	788.627	787.597	790.649	787.113	790.066	790.828
18	833.788	834.681	835.658	831.925	834.877	832.311
19	932.328	931.870	932.739	933.728	930.412	934.564

Table 1: Musical scale of the six instruments.

4. OPTIMIZATION STRATEGY

Having selected the bar profiles, the next stage consists of implementing a practical and efficient strategy for the tuning of the set of instruments. For struck percussion instruments, research has demonstrated the feasibility of precise and even difficult multi-modal tuning by devising sophisticated optimization strategies [2–5]. Implementation of these techniques to our case is relatively simple since only a single mode has to be tuned and a single parameter is involved in the geometry optimization. Two difficulties, however, emerge due to (i) the large number of bars to be tuned and (ii) the variability in geometry and/or mechanical properties of the original bar profiles. Indeed, the bars are necessarily cut from different aluminium profiles that inherently present small variations due to their industrial making process. Using the same fixed input parameters in all of our computations will hence result in differences between the actual and predicted vibratory behaviour, that then would be reflected in less-than-precise tuning in relation to the objectives. To overcome these difficulties, a two-step approach was retained. During the first stage, the bars are tuned to target frequencies slightly lower than the final objectives (40 cents) by performing first a global optimization and then a gradient-based optimization. Bars are then struck with a mallet and a simple spectral analysis is performed in order to identify the frequency of the dominant partials. If differences between the actual and predicted values are evidenced, improvement of the FE model is attempted manually in order to match the values, by changing the density and/or Young’s modulus used in the computations. Finally, after frequency matching, a second gradient-based optimization is performed in order to converge to the final target frequencies, using the new adjusted parameters and starting from the actual length of the bar to be tuned.

In practice, the complete optimization of the group of *sixxen* was performed instrument by instrument, starting from the lowest tone and tuning the other bars following the musical scale.

4.1. FEM modal analysis

Predictions of the tuning are drawn upon a 3D finite element model of the bars, built from the geometrical measurement of their cross-section. The central idea behind FEM is to build a spatially discretized version of the structure i.e. a mesh, from which engineering analysis can be performed. Developed in the late 50s, this technique has been extensively used to tackle issues in vibration predictions, including in music acoustics [7].

The construction of the mesh of the bars starts with a series of simple geometrical measurements made using a slide gauge, assessing the width, height and thickness. Having a rough description of their cross-section, the complete surface geometry is then virtually created by extrusion along the direction perpendicular to the cross-section - corresponding to the bar length, and by using alpha shapes algorithms. From the surface mesh, the final solid 3D mesh is computed by using a classic mesh generator. All bar models are comprised of 10-node tetrahedron solid elements arranged in an unstructured mesh, for which the number of elements is adjusted according to the target frequency.

The tuning prediction of each bar is then carried out based on vibration analysis concepts. Modal computations aiming at computing the natural frequencies of the bars are performed assuming free-free boundary conditions since bars will be positioned close to the nodes of the first vertical bending mode, and using estimates of the mechanical parameters. The material density is calculated from the mass and volume of the bar, which are directly measured and estimated from the 3D model respectively. The Young’s modulus and Poisson coefficient values used for starting the modal computations are the nominal known value of aluminium 1050, i.e. 71 GPa and 0.33 respectively. In practice, functions from the Matlab’s PDE Toolbox were used in all the task dealing with FE computations.

Figure 4 presents the first modes computed for one of the U-shape aluminium bar. If all the modes have an inherent 3D character due to the non-uniform geometry of the bar, the mode series starts surprisingly with a torsional mode, followed by a vertical-bending mode and other higher order modes that are combination of bending (vertical and lateral), torsional and longitudinal motions. Of course, a mechanical approach as proposed here can only offer partial information regarding sound radiation but a quick comparison between the sounding and FEM-computed frequencies evidences that the dominant sounding frequency comes from the second mode. This seems consistent with the monopolar radiation characteristic of the second mode seen in Figure 4. This result also indicates that a classification of the modal families is essential after each modal computation in order to assert the frequency of the major radiator to be accounted in the optimization procedure. To that end, we implement an automatic process for modal family identification following the work by Soares et al. [5].

4.2. Tuning optimization

Following the approach presented in [2], tuning is performed coupling a global and local optimization approach. The global optimization algorithm is first applied in order to search for a feasible region of solutions, and is then followed by a gradient-based optimization method in order to improve the convergence. As already mentioned, a method for automatic classification of the modes was also implemented in order to identify the first vertical bending mode which is responsible for the fundamental frequency of the sound radiated. As usual when performing

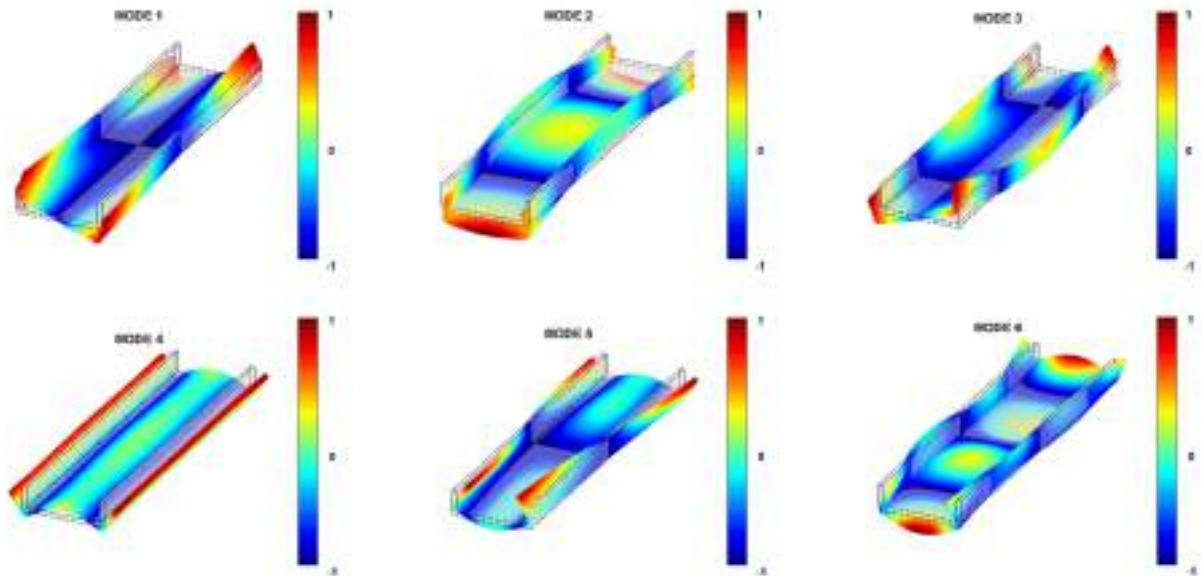


Figure 4: First six non-zero frequency modes computed by FEM for bar # 4. Modes are normalized such as $\max(|\varphi_n(\mathbf{r})|) = 1$.

stochastic optimization, the chosen global optimization method, here the simulated annealing method [8], relies on a large number of function evaluations that eventually leads to considerable computational costs. In our case, the optimization to perform remains very simple as it concerns a single variable, i.e. the length of the bar, and there was no real need, technically, of implementing such global optimization technique. With that said, the optimization consists of minimizing an objective function, here simply defines as the relative error given by:

$$\text{Err}(\ell) = \left| \frac{f_c(\ell) - f_0}{f_0} \right| \quad (1)$$

where f_0 and f_c are the target and computed frequencies of the first vertical bending mode and ℓ is the length of the bar to be determined. For the lowest tone of every instrument, the search space for the bar length was in the range $3W < \ell < 1.3$ m where W is the bar width and the initial solution was set to $\ell_0 = 0.5$ m. Successive bars are then optimized sequentially, starting from the previous optimal solution and reducing the search space in order to accelerate the convergence.

Before performing all the optimizations, the developed strategy was validated. Given frequency values identified experimentally from different specimens, the tests consist of recovering the known bar lengths by performing the optimization. For the four tested cases, ranging bar lengths from 0.5 to 1.2 m, errors less than 1% in bar length were found, thus validating the implementation of the tuning strategy.

4.3. Acoustic measurements

After each cut, acoustic measurements are performed for checking the frequency of the dominant radiating mode and eventually updating the FE model. This is achieved by striking the bar to one of its extremities and using a small-diaphragm condenser microphone AKG SE300, placed in the close sound field, and

connected to a PHOTON+ data acquisition system for frequency analysis. If necessary, model updating is performed manually by modifying the density and/or Young's modulus of the FE model based on physical reasoning until matching the actual and computed frequencies. With the new set of input parameters, the second optimization can be performed toward the final target frequencies.

5. CONSTRUCTION OF THE SIXXEN AND RESULTS

As described in Section 4, the construction of each instrument was achieved in two stages, ending with a final assessment of its overall tuning. In most cases, results were found in good agreement with predictions, falling within an acceptable tunability range. In other few cases however, bars were actually found out-of-tune with respect to the targets and need further manual tuning. This was no surprise because errors in the FE model and the construction process itself, make very unlikely that the final tuning is perfect. Indeed, the construction of the FE model relies on measurements and the procedure of model updating is not automatic. Certainly there were differences of detail in the bars geometry that could have been compensated by uncorrect values of the Young's modulus and density, and finally led to different modal behaviour. Moreover, bars were cut manually with a miter saw and errors in machine tolerance could have occurred. As long as the bars were lower in pitch than predictions, fine adjustments were performed with a sanding machine, by removing material. For the more delicate case of bars with higher pitch, the construction process benefits from the large numbers of bars to be tuned, allowing bars from different instruments to be interchanged.

An overview of the final tuning results of the full set of instruments is given in Figures 5 and 6. Figure 5 compares the measured and target frequencies expressed in *cent*, which is the micro-interval equal to one hundredth of a tempered semi-tone. Absolute tuning deviations are typically below 7 cents for all the instruments, with a maximum standard deviation of 6 cents.

Globally, each instrument shows an average tuning deviation of less than 2 cents over the musical scale. The plot in Figure 6 then shows the maximum of the beating frequency between all the instruments for each note of the musical scale. It shows that beating is in general less than 5 Hz, which is satisfactory according to the objective. It is worth noticing that beating frequencies of about 8 Hz are evidenced for some notes of the high register but this is the less-than-perfect tuning of these notes that contributes to this result. To give an illustrating view of the sound produced by a *sixxen*, Figure 7 is a spectrogram obtained by playing the musical scale on one of the built instrument. This particularly shows the expected global changes in timbre that occurs just before 2s due to the change of bar profile between bar numbers 6 and 7. Finally, Figures 8 and 9 present the final results of this project, with one of the *sixxen* and the set of instruments used during a live performance in Lisbon.

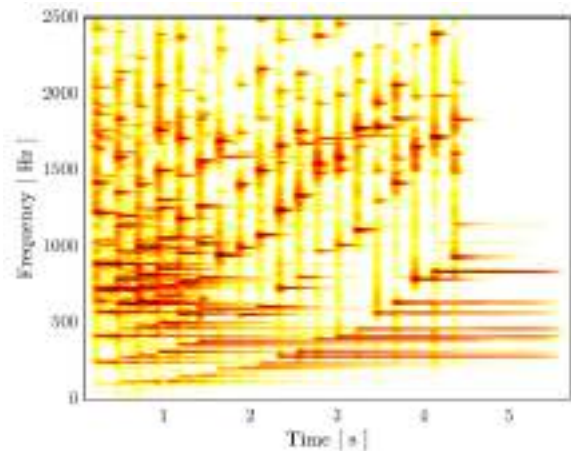


Figure 7: Spectrogram of the musical scale played on one *sixxen*.

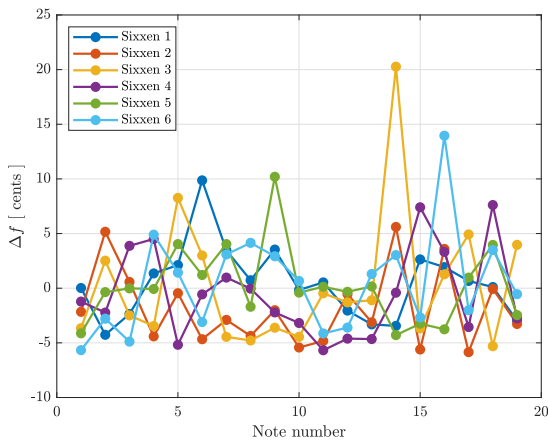


Figure 5: Tuning deviation for the set of *sixxen*.

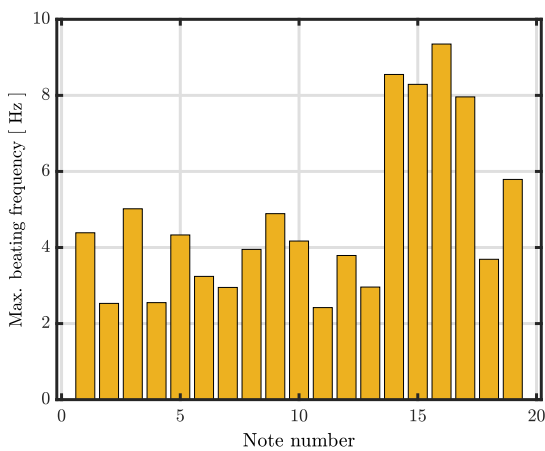


Figure 6: Maximum beating frequency among the set of *sixxen* calculated for the dominant sounding frequencies.

6. CONCLUSION

Toward the performance of Xenakis' masterpiece *Pléiades* by the Portuguese Chamber Orchestra, this work presents a concrete application of techniques developed in music acoustics for tuning bar percussion instruments. The problem offered by the composer to construct a set of *sixxen* was successfully addressed by combining FE modeling and optimization procedures. From the musical point of view, specific musical scales were defined for every instrument inspired by the *pelog* scale that influenced the composer in his work. From the knowledge of the precise microtonal intervals, the bars were cut manually to optimal lengths stemming from optimization algorithms and using predictions of the bar modal behaviour computed by FE model. Overall, the approach produced totally satisfying tuning results with tuning deviations generally falling below 7 cents for the full set of instruments, which is inaudible, and with controlled musical beats between the set of instruments. It would be interesting for future research to explore the radiation properties of the bars in the instrument design, which are rather surprising, and develop optimization scheme focusing directly on the sound properties of the bars instead of accounting for their dynamical behaviour.



Figure 8: One of the six *sixxen* built.



Figure 9: Concert of *Pléiades* at the Museum of Art, Architecture and Technology (Lisbon, 27/11/2022). Credits: Bruno Vicente.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

Our thanks to the team of the Portuguese Chamber Orchestra for their invaluable collaborations in the project.

8. REFERENCES

- [1] Diederik Mark de Ceuster, “Use 19 metal pieces of approximately the same timbre,” *Zeitschrift der Gesellschaft für Musiktheorie*, vol. 18/1, pp. 71–100, 2021.
- [2] L. Henrique and J. Antunes, “Optimal design and physical modelling of mallet percussion instruments,” *Acta acustica united with Acustica*, vol. 89, pp. 948–963, 2003.
- [3] J. Petrolito and K. A. Legge, “Designing musical structures using a constrained optimization approach,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, pp. 384–390, 2005.
- [4] D. Beaton and G. Scavone, “Optimization of marimba bar geometry by 3D finite element analysis,” in *Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics 2019*, 2019, pp. 402–407.
- [5] F. Soares, J. Antunes, and V. Debut, “Tuning of bending and torsional modes of bars used in mallet percussion instruments,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 150, 2021.
- [6] J. Harley, *Xenakis: his life in music*, Routledge, 1st edition, 2004.
- [7] A. Chaigne and J. Kegomard, *Acoustics of musical instruments*, Springer-Verlag, New-York, 20016.
- [8] P. van Laarhoven and E. Arts, *Simulated annealing: Theory and applications*, Reidel, Dordrecht, 1987.



VIBRATION ANALYSIS OF A PROTOTYPE GUITAR WITH A DOUBLE PLATE SOUNDBOARD COUPLED BY A SOUNDPOST

*Elena Torres Empanan*¹, *Paulo Vaz Carvalho*², *Rubén Picó Vila*³, and *Vincent Debut*^{4,5}

¹Universidad Politécnica de Valencia, Gandía, España

²Instituto de Etnomusicología, Centro de Estudos em Música e Dança, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

³Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Gandía, España

⁴Instituto de Etnomusicología, Centro de Estudos em Música e Dança, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal

⁵Instituto Politécnico de Castelo Branco – Escola de Artes Aplicadas, Castelo Branco, Portugal

RESUMEN

La guitarra es un instrumento musical que produce su sonido a través de la vibración de sus cuerdas, que es amplificada por la caja de resonancia. Parte de esta vibración se transmite a la tapa superior a través del puente, aunque no contribuye excesivamente a esta producción de sonido. A pesar de que, a lo largo de los años, los luthiers han experimentado con diferentes diseños para mejorar sus cualidades sonoras, en comparación con otros instrumentos de la familia de los cordófonos, se puede observar que la guitarra presenta un poder de radiación relativamente débil. A partir de las ideas de un luthier y guitarrista (PVC), se presenta una posible solución a este problema que consiste en dividir la tapa superior de la caja de resonancia en dos tapas de diferentes tamaños que interactuarían dinámicamente mediante la acción de un alma. En este trabajo exploramos esta idea. Se realizan medidas de vibración de ésta nueva guitarra, tanto sin alma como con alma, y se compara con el comportamiento de la guitarra clásica usual.

ABSTRACT

The guitar is a stringed instrument that radiates sound through the vibratory motions of its body and the air inside the cavity. Over the years, luthiers have experimented with different designs to improve its sound qualities but musicians still commonly complain about the rather weak radiation of the instrument. Stemming from the shared ideas of a luthier and a guitar player (PVC), a potential solution to this issue would consist of splitting the soundboard into two plates of different sizes that would dynamically interact through the action of a soundpost. In this work, we explore this idea. Experimental modal analysis of a prototype guitar is pursued, focusing on both configurations, i.e. with and without the soundpost, in order to

shed light on the singularities of its dynamical behaviour with comparison to conventional classical guitars.

Keywords: guitar, split-soundboard, soundpost, experimental modal analysis, music acoustic.

1. INTRODUCTION

The guitar is a musical instrument that produces sound by plucking strings that are structurally coupled to the instrument body for efficient radiation [1]. This occurs via the bridge that receives the string vibrational energy and in turns excite the soundboard and the other components parts. When comparing the acoustic properties of guitars to instruments from the violin family, it becomes evident that guitars produce only a rather small amount of sound. Aside a number of subjective factors [2], this lack of radiation efficiency is certainly the results of a combination of complex physical factors including namely the shapes of the body modes or their small number in the high frequency range [3]. The choice of a particular bracing in the top plate as well as the existence of other internal reinforcements such as the waist bar [4] localize the whole vibration to specific areas of the soundboard and could thus reduce the effective radiating surface drastically. To overcome this issue, we study here the vibrational behaviour of a new soundboard design proposed by a luthier and a guitarist (PVC). This design involves to split the top plate into two plates of different sizes that interact dynamically through the action of a soundpost, as found in the violin. It is important to note that the soundpost is *not* inserted between the top and back plates as in [5] but that the top plate is here divided into two parts connected by the soundpost. This arrangement would allow to distribute the string energy into two different top plates, with different mechanical and radiation properties, and could result in more effective radiation, in particular from the region above the waist. Other motivation behind this particular design is to break tradition rules in instrument making and extend the sonic possibilities of classical guitars. By adjusting the position of the soundpost, this new guitar could offer a variety of different musically interesting timbre where the soundpost would

etoremp@epsug.upv.es

Copyright: © 2023 . Elena Torres Empanan et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

act as the control parameters, changing the natural frequencies, modal damping and mode shapes of the guitar box.

One can find a large number of work dealing with the influence of the soundpost in the literature of violin research [6–9]. Aside the structural reinforcement that offers its insertion between the top and back plates, its essential acoustic purpose is to introduce distortion in the mode shapes, thus transforming initially non-radiating symmetric modes into efficient sound radiators [6]. Its role in defining the overall sound character of the instrument is well known by musicians and luthiers, who take great care in its set-up, specifically adjusting its placement, tightness and fit [9–12]. One of the consequence of a good adjustment is an overall increase of the sound radiation, mainly in the low frequency range, which could benefit to previously mentioned issues of the guitars.

Based on a collaboration with a musician and an instrument maker, the main purpose of this work is to explore this new guitar design and discuss its vibrational characteristics from experimental techniques of vibration analysis. Both configurations without and with the soundpost are studied and compared to modal data of a classical guitar. We also conduct a parametric study involving variations to the location of the soundpost that aims at giving a feel of its effect on the vibrational behaviour of the instrument body.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The studied guitar is a concert instrument built with typical materials and dimensions of a classical guitar. The soundboard is crafted from pine wood, includes a traditional bracing but differs in design: it is actually divided into two plates that are separated by a vertical distance of about 3 cm and that overlap in a limited region where the soundpost can be fitted. The “soundhole” has a rectangular shape of about 73.5 cm², which is slightly larger than the area of traditional circular soundholes, which are typically of about 50 cm² [13].

During measurements, the guitar was freely suspended via two elastic bands stretched between the ceiling and the headstock as seen in Figure 1. As usual in measuring input admittance of string instruments [14], the strings were muted to prevent any string vibration residue in the instrument body response. Also the instrument was put under normal playing constraints by tuning the strings to their nominal values.

To study the vibrational performance of the instrument, we consider measuring the body admittance, which is the vibrational response of the guitar body to an impulse excitation. The force input is generated and measured using a small instrumented hammer (PCB 084A17) while two accelerometers (B&K type 4375) are used to capture the body response: one mounted on the first top plate, close to the bridge saddle, and the second mounted on the second top plate, in the middle right side. Both sensors were fixed using a thin layer of bees-wax. Each signal captured by the accelerometers is amplified using a charge amplifier (B&K 2635) and then connected to a signal analyzer (B&K Photon+), where post-processing based on Fourier transform techniques is performed for calculating the transfer functions. A schematic diagram of the measurement instrumentation is given in Figure 1.

3. MODAL IDENTIFICATION

For modal identification, an implementation of the Eigensystem Realization Algorithm [15] was used, fed by a set of impulses response functions expressed in terms of velocity, calculated after

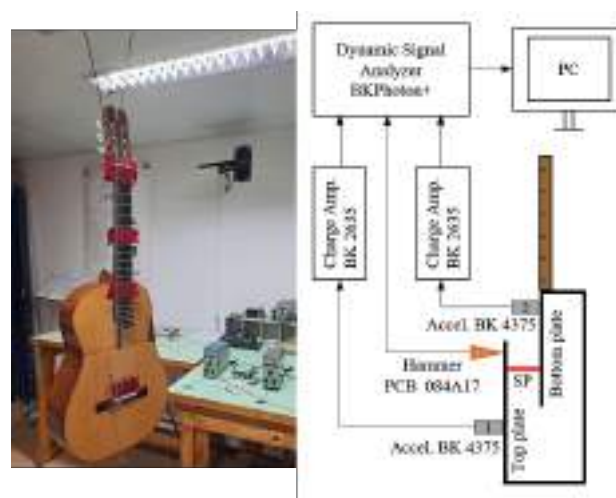


Figure 1: Left: prototype guitar under test. Right: diagram of the apparatus used during measurements.

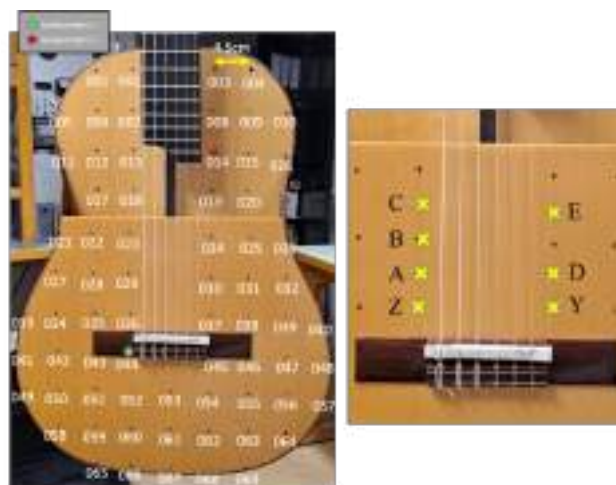


Figure 2: Left: experimental mesh for the full modal identification. Right: positions of the soundpost for the parametric study.

integration of the measured accelerometer signals. The algorithm is based on a state-space formulation of the system dynamics and attempts to identify a linear mathematical model to match the impulse responses of the structure. It combines the set of free decay responses to build a generalized Hankel matrix and then estimate the order of the model by using singular value decomposition. The last step of the algorithm consists of computing the eigenvalues of the chosen minimum model from which the modal parameters are extracted. This algorithm has been recognized as being very effective for the modal identification of complex systems.

Two series of measurements were conducted. The first measurements concerned a full modal identification of the guitar in both configuration, without and with the soundpost. To that end, a mesh of 69 test locations regularly spaced on the two top plates was defined and impact excitation was performed on all of the points (see Figure 2). A total of 276 impulse responses was recorded. The modal identification then provides the modal

frequencies and modal damping values of the top plates, as well as the corresponding mode shapes. The second series of measurements aimed at investigating the influence of the soundpost position on the vibrational behaviour of the guitar. Seven arbitrary positions were considered, all between the bridge and the soundhole as shown in Figure 2. For each soundpost location, two impact excitations were given at the sensors locations, resulting in four response signals. In that case, the modal identification provides estimates of the modal frequencies and modal damping values only.

For illustration, Figure 3 presents an example of a measured impulse response and its corresponding transfer function together with the reconstructed signals synthesized from the identified modal parameters. As seen, the global fit performed over the entire bandwidth is not perfect as some modes are actually missing in the identification. This comes from a by-product of modes that do not respond strongly (modes with a node close to sensor and/or excitation positions or modes of the back plate for instance) and the low-order of the model that is chosen. However, the fit seems good enough for identifying the dominant modes as it reproduces the main dynamics observed in the time-domain impulse response.

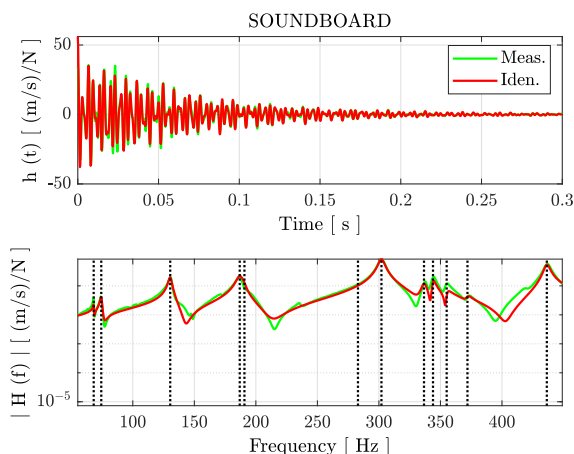


Figure 3: Measured (green) and identified (red) impulse responses (top) and transfer functions (bottom) of the guitar with soundpost. Soundpost positioned at point A ; excitation: point 55; response: point 14. The vertical dashed lines indicate the identified modal frequencies .

4. MODAL DATA ANALYSIS

4.1. Guitar without and with soundpost

Before discussing the identified modal data, a global view of the influence of the soundpost on the distribution of the vibrational energy is given in Figure 4. It is a plot of the average power spectrum defined as:

$$APS(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_n(f)|^2 \quad (1)$$

where N is the total number of measured transfer functions. This is a simple quantity that evidences the relative strength of the mode and here gives a direct visualization of the frequency region

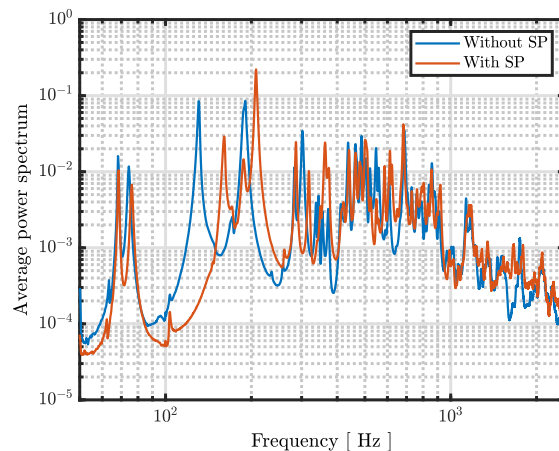


Figure 4: Average power spectrum calculated for the configuration with and without soundpost (SP). Soundpost position: A.

where the soundpost affects the behaviour of the guitar body. Figure 4 shows the average power spectrum calculated from the full set of transfer functions, for the two studied configurations. Large differences, both in terms of amplitude level and peak localization, can be seen until 450 Hz while above that, the two curves remain closer. On the whole, this indicates that the soundpost has little effect at high frequencies and suggests to focus on the low-frequency body behaviour.

A more detailed analysis of our results is then pursued by comparing the modal parameters identified for the two configurations, without and with the soundpost. Figure 5 presents the mode shapes, together with the modal frequency and modal damping values, identified in the low-frequency range. Surprisingly, it does not seem likely from Figure 5 that the soundpost has a strong effect on the mode shapes, except for the third mode for which the soundpost introduces a node and creates a strong asymmetry. This occurs because of the relative motion between the plates before the soundpost is added. Indeed, in the low-frequency range, the soundpost behaves like a rigid body [8] and one expects that modes involving out-of-phase plates motions before introducing the soundpost would be strongly disturbed. For instance, it seems that the third mode can be interpreted as the in-phase combination of modes 3 and 4 of the uncoupled configuration.

Focusing on the configuration without soundpost, one understands that the lower modes actually involve motions of both top plates. This means that, even with no soundpost, coupling exists between the plates and this can only occur through structural components, namely the ribs, and the air inside the cavity. Conversely, at high frequency, the vibratory energy becomes more localized in one of the two plates. Interestingly, this confirms that the tested guitar includes two main radiating components that could act in different frequency ranges, similarly to what is found in a loudspeaker, where woofers and speakers are used to radiate different frequencies. However, it is worth noting that this configuration, i.e. without the soundpost, is clearly not efficient since the second radiator can only be weakly excited due to the lack of an efficient coupling.

While it was pointed out that the differences between the two configurations remain small globally, the insertion of the soundpost

however introduces local differences that could have large influence on the radiated sound. For instance, the fifth mode becomes slightly distorted by the insertion of the soundpost, with a node created at its location, and is no longer a pure dipole. Moreover, the soundpost seems to reinforce the already-existing small coupling in some modes - see modes 4, 6 and 7, and slightly increases the vibrating area. Interestingly, the introduction of the soundpost also makes likely that the lower top plate receives more vibrational energy from the strings, and this could change and/or enhance the overall sound radiation and character of the instrument. Finally, note that some modes certainly remain almost unaffected by the soundpost, which can occur if the soundpost is located at a nodal point of the mode shape.

As seen in Figure 4, the introduction of the soundpost is also accompanied by a rise in frequency for some of the lower modes, a fact that is consistent with studies on the violin [7, 8]. The comparison of modal damping values is not obvious and there seems to be no clear trend in the observed changes. As for any coupled structures, changes do occur when inserting the soundpost but the effect certainly depends on other details, in particular the way the soundpost is fitted.

To have a clearer view of the unique features of the test guitar, it seems interesting to compare our results with modal data obtained on a classical guitar. By looking at the mode shapes presented by Richardson in [16], it is first straightforward to understand that the low-frequency modes are very similar for both guitars. Not surprisingly, new modes are also brought out by the new degree of freedom offered by the soundpost. Overall, it seems that the soundpost retains the modes of the classical guitars but brings new coupled modes that are dominated by motions of the individual plates as if they were uncoupled. Notably, for sufficient string/body strength, these new modes could lead to perceived musical qualities in the sound radiated.

Looking at Figure 6, our results are now compared to guitar data obtained by one of the authors using a similar set-up [17]. In addition to the new mode, which becomes apparent at around 160 Hz, differences in the response amplitude of the instrument body are pronounced in the low-frequency region, while the two curves remain closely aligned in the high-frequency range, when modes overlap. To see what differ between the instruments in this frequency range, we perform a simple average of the measured transfer functions. Averaging is calculated using a bandwidth of 1000 Hz. The results in the lower plot of Figure 6 show an interesting structure. Although the two instruments show similar amplitude response, the general trend obtained by averaging slightly differs. In particular, the magnitudes for the test guitar remain higher up to about 1000 Hz, and then decrease above that value. Whether the differences are significant from a musical standpoint remains an open question and certainly deserves further investigation, in particular by studying the radiating properties of the instrument.

4.2. Influence of the location of the soundpost

Finally, other aspect studied in this work is the influence of the soundpost location on the vibrational behaviour of the test guitar. Figure 7 presents the set of transfer functions measured in the different positions shown in Figure 2, which were arbitrarily defined. Globally, it is no surprise that the location of the soundpost has a small influence at high frequencies while it has a profound influence on the low-frequency mode. From a closer view of the transfer function, it is actually apparent that moving the soundpost is

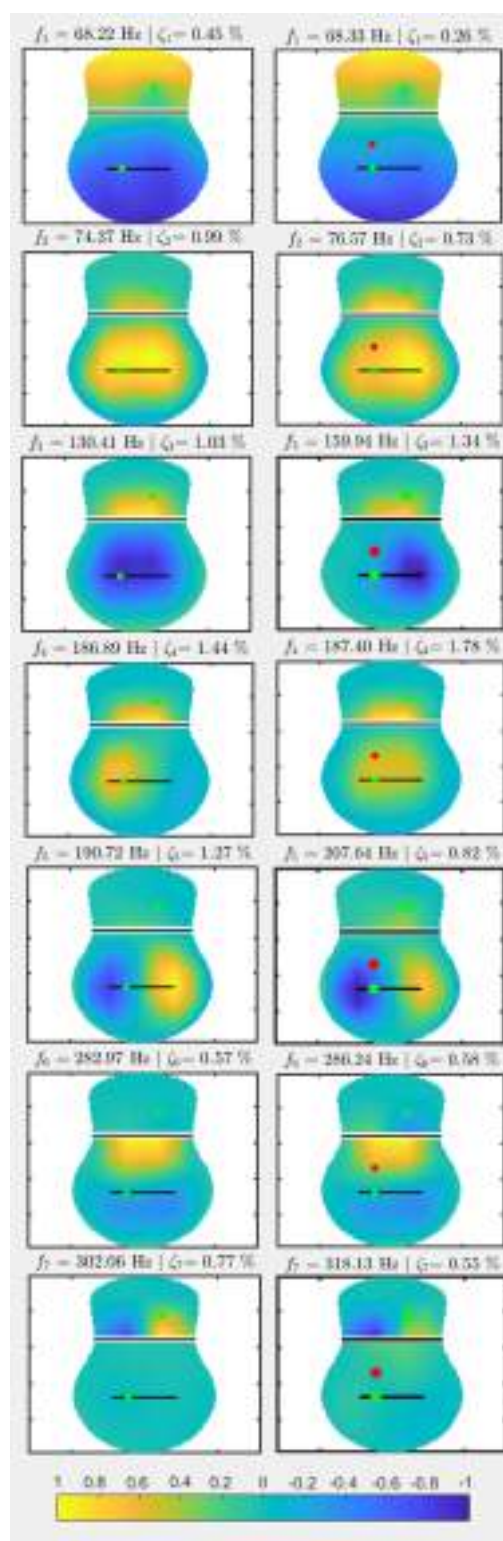


Figure 5: Real part of the first experimentally identified mode shapes with (right) and without (left) soundpost. Green and red dots are the positions of the accelerometers and soundpost respectively. Mode shapes normalization such as: $\max(|\varphi(x, y)|) = 1$.

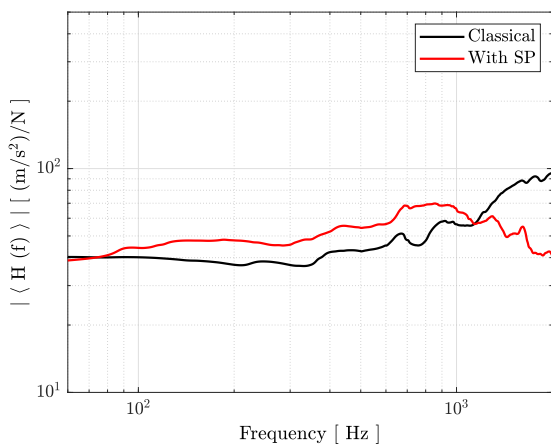
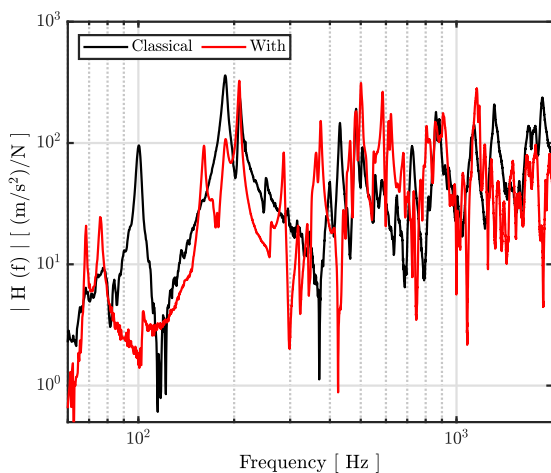


Figure 6: Top: magnitude of measured transfer functions. Bottom: band-averaged transfer function. Black: classical guitar ; red: tested guitar with soundpost

accompanied by changes in both the frequencies and the amplitude responses of the first modes. For instance, the amplitude response of the third mode around 160 Hz reduces of about 20 dB when moving the soundpost from location Y to Z.

Figure 8 is an attempt to quantify the changes in modal parameters statistically. As can be seen, there is a noticeable change in the frequency of the fourth mode with the soundpost location, of about 10 Hz. Regarding modal damping values, the variations remain rather small, except for the third mode. If these modes play a significant role in the radiated sound, then alterations in their frequency and damping values are likely to have audible consequences, and this is of direct interest for musicians since the tonal character of the instrument would be somehow adjustable.

5. CONCLUSIONS

Based on modal analysis, this work explored the features of a new design of guitar, for which the soundboard consists of two separated plates coupled through a soundpost. Two important questions were addressed: (i) how does the new guitar differ from other guitars, and (ii) how does the soundpost influence the dynamics of the

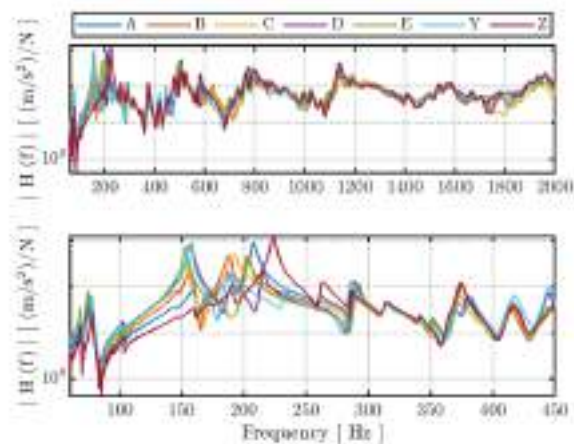


Figure 7: Magnitude of the measured transfer functions as the location of the soundpost is varied. Input acceleration measured close to the bridge.

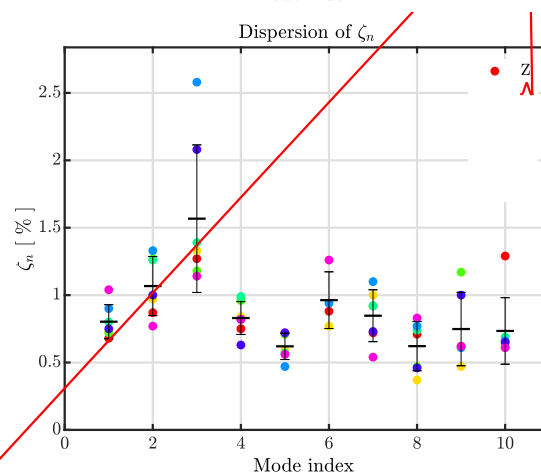
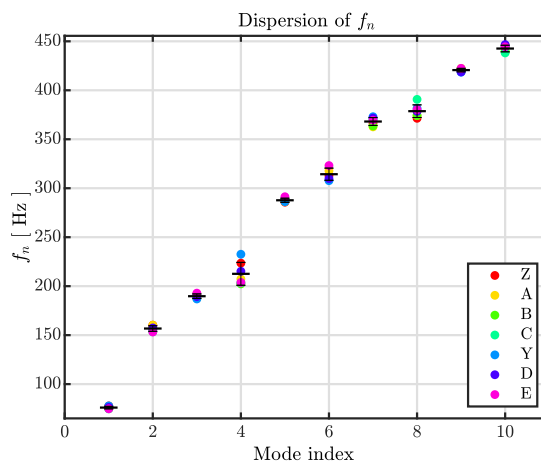


Figure 8: Influence of the soundpost location. Top: identified modal frequencies ; below : identified modal damping. Each color stands for one position. For each mode, the horizontal black line is the average and the error bar represents the standard deviation.

instrument? From our analysis, it appears that the tested guitar shares modal features with a conventional classical guitar. The principal lower-order modes are actually spread across the same frequency range, follow the same order and present similar modal shapes. The soundpost however introduces new modes that involves motions controlled by one of the top plates mainly, as if they were isolated. Regarding the influence of the soundpost, the most noticeable differences are seen in the low frequency range, below 450 Hz. Changes in the modal frequencies, the modal shapes as well as the modal amplitude responses are clearly evidenced. Notably, this could provide a variety of tonal qualities to the instrument but most importantly, it remains to be analyzed whether these modes are efficient radiators.

It seems evident that further work is needed to establish the full character of the new guitar. A vibrational approach, as devised in this work, is certainly useful for understanding the acoustical performance of an instrument; however, its capacity to interpret the full range of musical effects remains limited. Finally, it seems important to stress that this new guitar opens up a new frontier in acoustic guitar design while it has been steeped in tradition for centuries. This project offers a realm to explore new dynamics and new shapes of instruments with perhaps, new musical possibilities.

6. REFERENCES

- [1] Rossing, T.D, *The sciences of string instruments*, Springer, New York, 2010.
- [2] F. Orduna Bustamante, “Experiments on the relation between acoustical properties and the subjective quality of classical guitars,” *Catgut Acoust. Soc. J.*, vol. 2, 1992.
- [3] I. Perry, *Sound radiation measurements on guitars and other stringed musical instruments*, Phd thesis, Cardiff University, 2014.
- [4] R.M. French, *Engineering the Guitar: Theory and Practice*, Springer, New-York, 2009.
- [5] T.J.W. Hill, B.E. Richardson, and S.J. Richardson, “Analysis of guitar tones for various structural configurations of the instrument,” *Acustica-Acta acustica*, vol. 82, pp. 793–796, 1996.
- [6] J.C. Schelleng, “The action of the soundpost,” *Catgut Acoust. Soc. Newsl.*, vol. 16, 1971.
- [7] G. Bissinger, “Some mechanical and acoustical consequences of the violin soundpost,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, pp. 3154–3164, 1995.
- [8] H.O. Saldner, N.E. Molin, and E.S. Jansson, “Vibration modes of the violin forced via the bridge and action of the soundpost,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, pp. 1168–1177, 1996.
- [9] M.C. Nadarajah, *The mechanics of the soundpost in the violin*, Phd thesis, Cambridge University, 2018.
- [10] N. E. Molin, A. O. Wahlin, and E. V. Jansson, “Transient wave response of the violin body,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 88, pp. 2479–2481, 1990.
- [11] C. Gough, “Violin plate modes,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 137, pp. 139–153, 2015.
- [12] J. E. McLennan, *The soundpost in the violin*, Balbo Press, 2020.
- [13] G. Cuzzucoli and M. Garrone, *Classical guitar design*, Springer, Switzerland, 2020.
- [14] J. Woodhouse and R.S. Langley, “Interpretating the input admittance of violins and guitar,” *Acustica-Acta acustica*, vol. 98, pp. 611–628, 2012.
- [15] Juang, J., *Applied System Identification*, PTR Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1994.
- [16] B.E. Richardson, “The acoustical development of the guitar,” *Catgut Acoust. Soc. J.*, vol. 2, 1994.
- [17] J. Antunes and V. Debut, “Dynamical computation of constrained flexible systems using a modal Udwadia-Kalaba formulation: Application to musical instruments,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 141, pp. 764–778, 2017.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

ASA-0 Acústica submarina Hidroacústica.

EFECTO DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN TANQUES SOBRE LAS SEÑALES HIDROFÓNICAS

Ruben Fraile Muñoz*, Sara Pérez Rodríguez, Gianna Arencibia Castellanos,
Juana María Gutiérrez Arriola, María Castillo Moral

CITSEM, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

La obtención de parámetros descriptores del comportamiento de los peces durante su proceso de cría en instalaciones de acuicultura resulta muy relevante en la evaluación de la calidad de este proceso. Uno de los rasgos más descriptivos de tal comportamiento es el movimiento, tanto de cada individuo como de todo el grupo. Y resulta evidente que el movimiento de los peces provoca, a su vez, perturbaciones en el medio acuático que los rodea. La cuestión que se analiza en este trabajo es si es posible obtener información sobre el movimiento del agua a partir de una señal unidimensional como la señal acústica captada por un hidrófono. Para ello, se ha instalado un hidrófono de banda ancha, que alcanza frecuencias infrasónicas, en diversas posiciones de un tanque de agua y se ha provocado el movimiento de la misma mediante dos dispositivos diferentes. Se presentan diversos análisis de la relación entre la potencia de estos dispositivos y la energía de la señal en diversas zonas del espectro.

ABSTRACT

The measurement of objective parameters describing fish behavior in aquaculture is relevant for evaluating the quality of their raising process. Swimming movement is an important aspect of such behavior, and this may be described both at individual and group levels. It is fairly evident that fish movement causes dynamic perturbations in the surrounding aquatic environment. The question approached in this research work is whether information about water movement can be obtained from a one-dimensional signal, such as the one captured by a hydrophone. For this purpose, a wideband hydrophone reaching the infrasonics band has been placed in several positions inside a water tank for capturing the acoustic signal corresponding to the water movement caused by two different devices. The relation between the power of such devices and the signal energy in several spectral bands is reported.

Palabras Clave— Acústica subacuática, Monitorización del agua, Procesamiento de señales acústicas.

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización automática tanto del ambiente acuático como del comportamiento de los peces en instalaciones de acuicultura se está convirtiendo en necesaria con el fin de reducir riesgos para los propios peces y mejorar la productividad [1]. Particularmente, la monitorización basada en tecnología acústica lleva más de una década utilizándose con finalidades como la estimación del número de peces en tanques, o la medida de su crecimiento [2]. Entre los sistemas acústicos de monitorización se puede distinguir entre sistemas activos, cuyo funcionamiento se basa en el análisis conjunto de señales transmitidas y recibidas (e.g. sistemas SONAR), y sistemas pasivos, que procesan únicamente las señales captadas por hidrófonos [3]. Estos últimos son preferibles en el caso de especies especialmente sensibles a estímulos acústicos en las frecuencias de trabajo de los sistemas activos [3]. Típicamente, la utilización de sistemas pasivos de monitorización acústica tiene como objetivo analizar los sonidos emitidos por los peces, por ejemplo mientras son alimentados [4], considerando ruido el sonido captado proveniente otras fuentes.

En este trabajo se analiza la viabilidad de usar sistemas pasivos de monitorización acústica para supervisar el comportamiento natatorio de los peces. El comportamiento natatorio se ha monitorizado previamente mediante sistemas activos (e.g. [2]). La propuesta de monitorizarlo usando sistemas pasivos se basa en la hipótesis de que las vibraciones del agua provocadas por los peces al nadar son detectables como señal de baja frecuencia por un hidrófono. Esta hipótesis tiene dos partes: en primer lugar, se supone que las vibraciones del agua tienen un impacto identificable sobre la señal hidrofónica; en segundo lugar, la veracidad de la hipótesis implica que el movimiento de los peces es capaz de generar vibraciones con energía suficiente como para ser

* **Autor de contacto:** r.fraile@upm.es

Copyright: ©2023 Fraile et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

detectada por el hidrófono. Aquí se trata de comprobar la primera parte de la hipótesis. Para ello, se han realizado experimentos de laboratorio sobre un tanque lleno de agua. En el tanque se ha instalado un hidrófono de banda ancha y se ha analizado el efecto que tiene sobre la señal hidrofónica el movimiento del agua provocado por dos dispositivos diferentes: un filtro de flujo constante y una bomba de circulación de agua.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Fuentes acústicas en medio subacuático

Típicamente la monitorización acústica pasiva en acuicultura se basa en analizar los sonidos emitidos directamente por los peces [3, 4] considerando otras fuentes como ruido. No existe mucha investigación relativa a fuentes acústicas detectables en tanques de acuicultura, pero algunos estudios indican que las vibraciones mecánicas producidas por flujos de agua, bombas, vibraciones del propio tanque, etc. producen señales acústicas de baja frecuencia, alcanzando incluso bandas infrasonicas [5]. En mar abierto, en zonas poco profundas (hasta unos 180 m), estudios ya clásicos también informan de que el movimiento del agua debido a vientos, ondas de superficie, turbulencias y similares, junto con los fenómenos sísmicos, tiene impacto sobre la zona más baja del espectro, alcanzando frecuencias tan bajas como 1 Hz [6, 7]. De todo ello se puede deducir que el impacto más relevante del movimiento del agua sobre la señal hidrofónica se espera en la banda de frecuencias infrasonica.

2.2. Velocidad de fase y modos

La velocidad de fase del sonido en el agua depende de factores como la temperatura, la salinidad, o la presión (que a su vez es función de la profundidad) [8]. En el caso de agua marina en aguas poco profundas y a temperaturas de en torno a 20°C la velocidad de fase tiene un valor cercano a 1500 m/s [8, 9].

En principio, las medidas acústicas realizadas en tanques de agua pueden verse muy afectadas por la aparición de modos que introduzcan discontinuidades en la respuesta del tanque. Ello provocaría que la relación entre la energía de la fuente acústica (el movimiento de los peces en este caso) y la energía de la señal hidrofónica fuera muy diferente en las frecuencias modales con respecto al resto. La distancia entre modos consecutivos en tanques de agua se puede estimar como [10]:

$$\Delta f_{\text{MOD}} = \frac{c^3}{4\pi f_{\text{MOD}}^2 \cdot V} \quad (1)$$

siendo c la velocidad de fase, f_{MOD} la frecuencia central del modo, y V el volumen del tanque. Tomando como referencia una velocidad de fase de 1500 m/s y una frecuencia máxima

de 30 Hz, se tendría la siguiente relación aproximada entre volumen y distancia entre modos:

$$\Delta f_{\text{MOD}} \approx \frac{298000}{V} \quad (2)$$

Para que apareciera un modo por debajo de 30 Hz, y teniendo en cuenta que se ha considerado $f_{\text{MOD}} = 30$ Hz, se debería cumplir:

$$\Delta f_{\text{MOD}} \leq 30 \text{ Hz} \Rightarrow V \geq \frac{298000}{30} \approx 9950 \text{ m}^3 \quad (2)$$

es decir, se necesitarían tanques que en el caso de ser cúbicos deberían tener una arista con una longitud superior a 21 m. Dado que los tanques típicamente usados en acuicultura tienen un tamaño mucho menor [5], y el tanque usado en el laboratorio para este experimento es aún más pequeño, se puede suponer que en este caso no hay frecuencias modales en la banda infrasonica.

2.3. Absorción

De modo general, la absorción de energía en el medio acuático es mucho menor que en el medio aéreo [9]. Como la velocidad de fase, el coeficiente de absorción también depende de la salinidad del agua, pero de modo aproximado se puede suponer que es proporcional al cuadrado de la frecuencia [11] (más absorción a mayores frecuencias), con valores aproximadamente constantes a bajas frecuencias [10, 11]. Todo ello supone que en tanques de agua y en la banda de frecuencias de infrasonidos los tiempos de reverberación serán largos, factor que debe ser tenido en cuenta para realizar el diseño experimental.

3. EXPERIMENTOS

3.1. Montaje

La evaluación del efecto del movimiento del agua sobre la señal hidrofónica se realizó sobre un tanque de agua montado en el laboratorio. La Figura 1 muestra una fotografía del montaje y un croquis de la planta hexagonal del tanque. La superficie del tanque era de 0,351 m², y fue rellenado con agua salada (salinidad de 30 g/l) hasta una altura de aproximadamente 0,420 m, resultando pues un volumen de agua de aproximadamente 0,147 m³.

El agua del tanque era filtrada usando un filtro Eheim ecco de 5 W de potencia nominal, con un caudal de 0,5 m³/h. La Figura 1 muestra la ubicación de la salida y el retorno de agua del tanque. El extremo de la manguera de retorno estaba situado por encima de la superficie del agua.

Además, en una de las paredes laterales del tanque (ver Figura 1) se colocó una bomba de circulación de agua SunSun CW-110 con potencia regulable hasta un máximo nominal de 10 W. El accionamiento de esta bomba no suponía flujo de agua neto a través del tanque como en el caso del filtro.

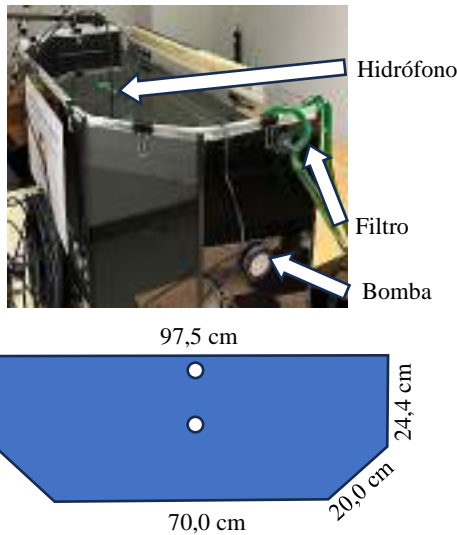


Figura 1. Tanque de agua en el laboratorio (foto y croquis de planta).

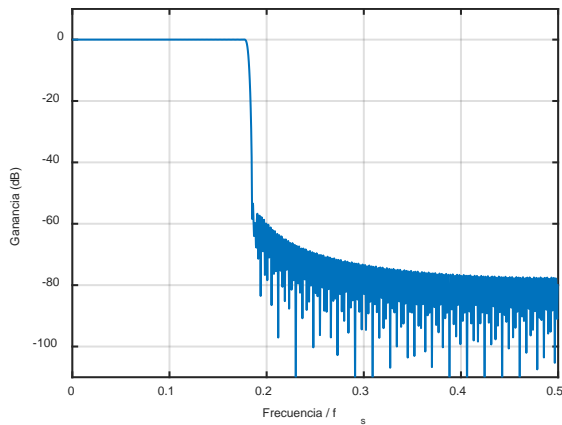


Figura 2. Respuesta del filtro paso bajo. La frecuencia es relativa a la frecuencia de muestreo.

3.2. Hidrófono

Las medidas se realizaron utilizando un hidrófono omnidireccional CR1A de Cetacean Research montado con un preamplificador Reson VP2000. Este sistema proporciona en su conjunto una banda de paso a -3 dB máxima desde 1 Hz hasta 48 kHz. La frecuencia de corte superior de la banda de paso del preamplificador se fijó en 1 kHz, teniendo en cuenta que la banda de interés quedaba muy por debajo de ese límite.

La digitalización de la señal se hizo con una tarjeta SpectraDAQ200 usando 24 bits de cuantificación y una frecuencia de muestreo estándar de 44,1 kHz. La tarjeta tiene

una frecuencia de corte inferior de 2 Hz, por lo que la banda de frecuencias del sistema global se extendía desde los 2 Hz hasta 1 kHz.

La ubicación del hidrófono en el tanque se fijó usando un soporte externo (Figura 1) en las dos ubicaciones marcadas en el croquis de planta del tanque (Figura 1, abajo) con un círculo.

3.3. Procesamiento de la señal

Con el fin de reducir el coste computacional se realizó un proceso de diezmado por factor 8, resultando una frecuencia de muestreo efectiva de 5512,5 Hz. Para evitar distorsiones de fase en la aplicación de un filtro antisolapamiento, el proceso se realizó en tres etapas, consistente cada una en un filtrado seguido de un diezmado por factor 2. Para el filtro de cada etapa se eligió un filtro de fase lineal con la respuesta ilustrada en la Figura 2, que tiene una frecuencia de corte a -3dB inferior al 20% de la frecuencia de muestreo.

El espectro de las señales filtradas y diezmadas ha sido estimado usando el algoritmo de Welch [12] con segmentos de 1 s.

3.4. Protocolo experimental

De modo general, el procedimiento de medida consistió en: (i) ubicar el hidrófono en la posición deseada, (ii) accionar el filtro, o ajustar la potencia de la bomba, y (iii) realizar una grabación de la señal hidrofónica. La duración de la grabación se estableció en un mínimo de 2,5 s con el fin de garantizar un promedio de al menos 4 segmentos de 1 s de audio con un solapamiento del 50% en la estimación del espectro.

En lo que se refiere a la ubicación del hidrófono, se eligieron una posición central y otra junto a la pared del tanque, tal como se indica en la Figura 1. En ambas posiciones se realizaron grabaciones con el hidrófono a tres profundidades: en el fondo, a media profundidad, y cerca de la superficie.

En el caso de la bomba la potencia era regulable, aunque el regulador no ofrecía información cuantitativa sobre la potencia de funcionamiento. Para estimarla se midió la intensidad de corriente proporcionada al sistema regulador-bomba por la fuente de alimentación de 24 V. Se eligieron tres posiciones del regulador, correspondientes al mínimo de potencia de funcionamiento, al máximo, y a un valor intermedio. Las potencias estimadas a partir de las medidas fueron de 1,03 W, 4,32 W, y 8,04 W.

Por otra parte, teniendo en cuenta la baja absorción del agua a bajas frecuencias se analizó cuál debía ser el tiempo mínimo transcurrido entre el ajuste del filtro o la bomba (paso

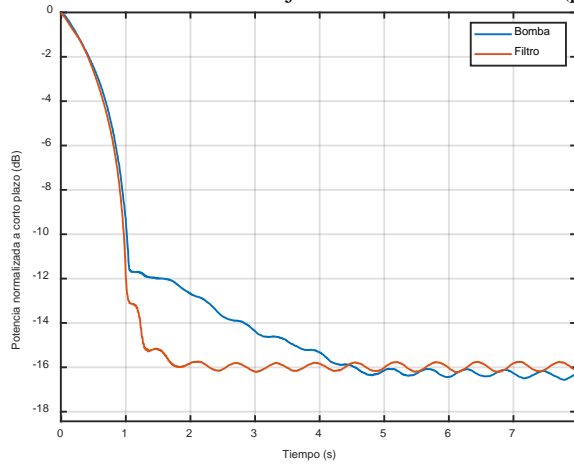


Figura 3. Evolución de la potencia normalizada a corto plazo (segmentos de 1 s) tras la desconexión de filtro y bomba en el instante inicial ($t = 0$).

ii) y la grabación (paso iii). Para realizar este análisis se realizaron dos grabaciones, una con el filtro activo y otra con la bomba, durante las cuales se desconectaron estos sistemas en un momento determinado. La Figura 3 muestra la evolución de la potencia media a corto plazo de la señal grabada a partir del momento de desconexión de filtro o bomba ($t = 0$). El intervalo de promedio fue de 1 s de duración y la potencia se normalizó con respecto al máximo antes de desconectar.

Tal como se aprecia en la gráfica, en ambos casos la potencia de la señal antes de la desconexión es unos 16 dB superior a la situación de reposo. También en ambos casos durante el primer segundo tras la desconexión se produce un descenso de 12 dB en la potencia. En el caso peor (el de la bomba), 5 s después de la desconexión se alcanza el régimen permanente de reposo. Consecuentemente, se decidió garantizar un intervalo de al menos 5 s entre el ajuste de filtro o bomba y el comienzo de la grabación.

4. RESULTADOS

4.1. Efecto del filtro de agua

La Figura 4 muestra los espectros de las señales grabadas con el hidrófono en las dos posiciones y tres profundidades antes indicadas, con y sin el filtro de agua en funcionamiento. Se ha representado el espectro entre 2 Hz y 30 Hz.

El filtro provoca un flujo de agua que es extraída del tanque por debajo del nivel de la superficie, y es vertida de vuelta al tanque por encima de la superficie. El retorno del agua provoca una onda superficial que es detectada por el

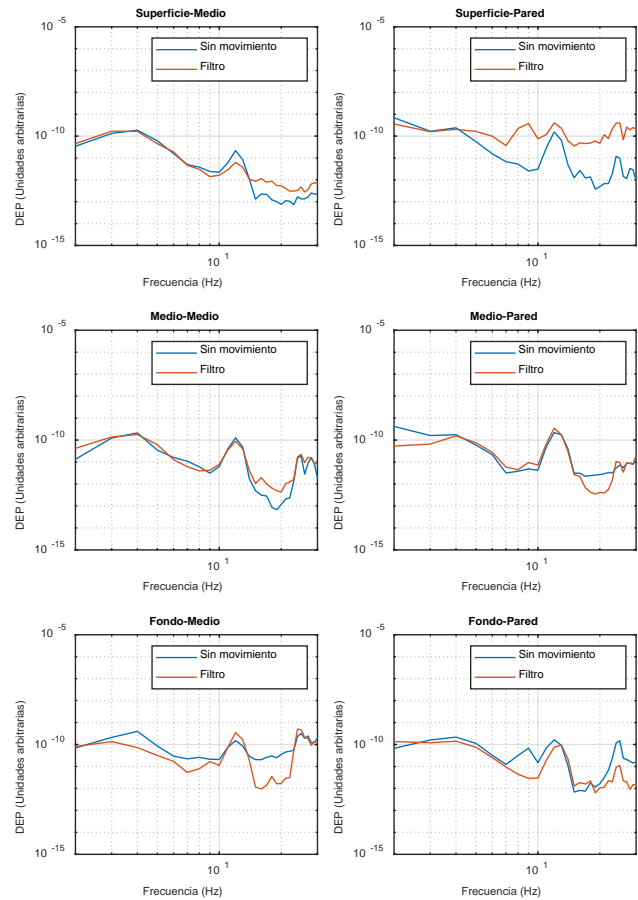


Figura 4. Efecto del filtro de agua sobre el espectro de la señal hidrofónica con el hidrófono situado en el centro (gráficas de la izquierda) y junto a la pared del tanque (derecha), y a tres profundidades diferentes: cerca de la superficie (arriba), a media profundidad (centro) y en el fondo (abajo).

hidrófono como un incremento en la energía entre 15 Hz y 30 Hz cuando es situado junto a la superficie. Alrededor de los 20 Hz esta tendencia se mantiene a media profundidad en el centro del tanque (gráfica “Medio-Medio” en la Figura 4), pero no junto a la pared. En las cercanías del fondo se observa un comportamiento llamativo en cuanto que la energía de la señal acústica es menor con el filtro encendido que con él apagado.

Para analizar estos resultados conviene considerar, en primer lugar, que el filtro fundamentalmente induce un flujo continuo, con pocas vibraciones de baja frecuencia, por lo que la similitud entre ambas señales por debajo de 10 Hz resulta razonable. Sin embargo, las paredes del tanque provocan condiciones de contorno de velocidad normal nula, lo que implica distorsiones en la onda acústica, incluso en su dirección de propagación [13], que resultan en efectos extraños. En las cercanías de superficie y pared, o de fondo y pared las condiciones son aún más singulares.

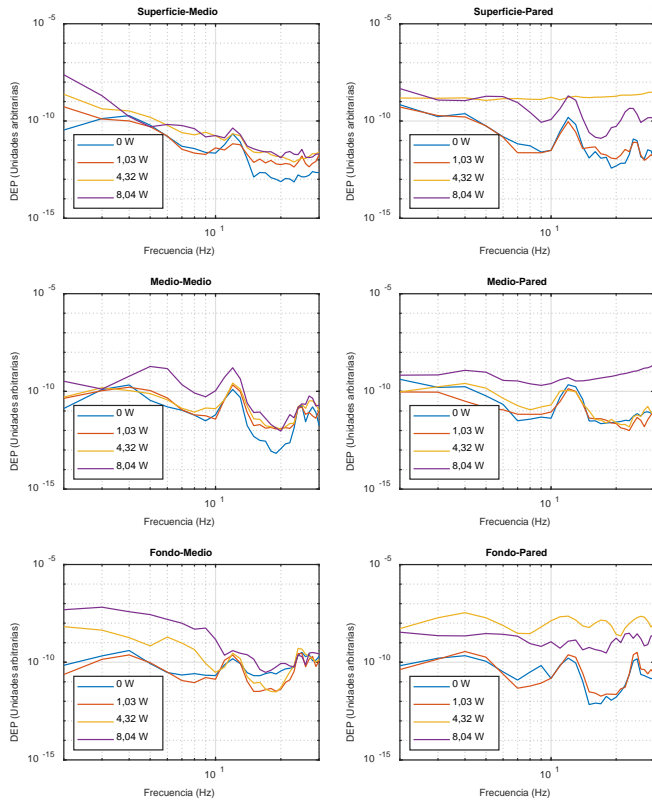


Figura 5. Efecto de la bomba sobre el espectro de la señal hidrofónica con el hidrófono situado en el centro (gráficas de la izquierda) y junto a la pared del tanque (derecha), y a tres profundidades diferentes: cerca de la superficie (arriba), a media profundidad (centro) y en el fondo (abajo). 0 W indica bomba desactivada.

4.2. Efecto de la bomba

La Figura 5 muestra los espectros obtenidos con las cuatro configuraciones de la bomba antes mencionadas: apagada (0 W), a baja potencia (1,03 W), a media potencia (4,32 W) y a máxima potencia (8,04 W) en todas las posiciones del hidrófono.

De modo general, se aprecia que las configuraciones de mayor potencia de la bomba (4,32 W y 8,04 W) se corresponden con mayores energías acústicas. Sin embargo, sólo se puede apreciar una ordenación de las gráficas coherente con la potencia de la bomba en la posición central del hidrófono y a media profundidad, es decir, en ausencia de condiciones de contorno que distorsionan la onda acústica [13]. Esta observación se puede confirmar analizando la relación entre la potencia de la bomba y la energía del espectro entre 2 Hz y 30 Hz. En la gráfica superior de la Figura 6 se puede observar cómo esa relación es monótona sólo en el caso de la posición central y a media profundidad, y que las mayores oscilaciones se dan en las cercanías de la pared del tanque. Cerca de las superficies limitantes del tanque, aunque se puede diferenciar entre las configuraciones

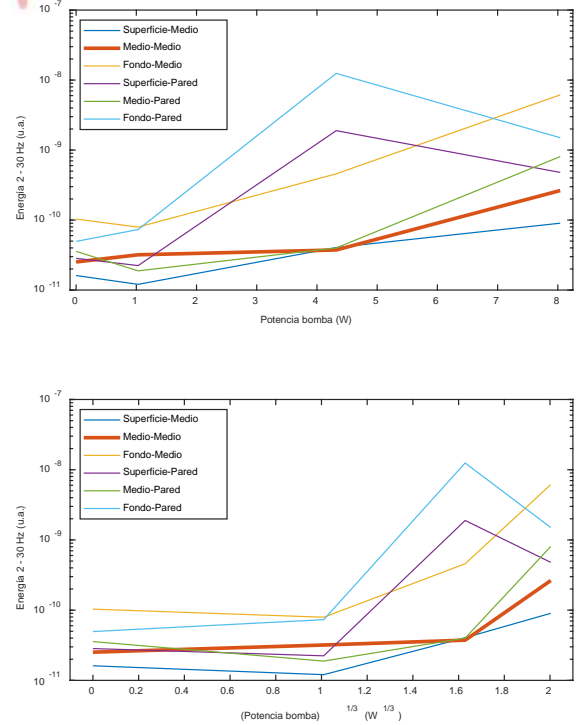


Figura 6. Relación entre la energía de la señal acústica entre 2 Hz y 30 Hz y la potencia de la bomba (arriba), y su raíz cúbica (abajo).

de menor potencia (0 W y 1,03 W) y las de mayor (4,32 W y 8,04 W), no se cumple que una mayor potencia de la bomba implique una mayor energía de la señal acústica entre 2 Hz y 30 Hz.

En la gráfica de abajo de la misma Figura 6 se muestra la relación entre la energía de la señal en el mismo intervalo y la raíz cúbica de la potencia de la bomba, que se estima aproximadamente proporcional a la velocidad de giro y al caudal en bombas de rotación [14].

5. CONCLUSIONES

En los experimentos realizados se ha analizado la viabilidad de usar sistemas de monitorización acústica basados en hidrófonos para evaluar las vibraciones de baja frecuencia del agua asociadas a su movimiento. De los resultados obtenidos se puede concluir que las vibraciones del agua asociadas a movimientos observables de elementos mecánicos son detectables en la zona infrasónica del espectro de la señal hidrofónica. Cuando las vibraciones son superficiales, aparentemente es necesario situar el hidrófono cerca de la superficie para detectarlas. Sin embargo, cuando la fuente de movimiento es subacuática si el hidrófono se sitúa lejos de paredes, fondo y superficie del agua se observa una relación monótona entre la energía de la señal entre 2 Hz y 30 Hz y la velocidad de movimiento de los elementos causantes del movimiento, los álabes de la bomba en este caso.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada con fondos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, NextGenerationEU, por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a través del proyecto “*Aplicación de tecnologías de visión e inteligencia artificial a la mejora del proceso productivo (Acuicultura 4.0)*” concedido en la convocatoria del “*Real Decreto 685/2021, de 3 de agosto, por el que se establecen las bases reguladoras de subvenciones a agrupaciones de entidades que realicen proyectos de inversión y reforma en materia de investigación para el desarrollo tecnológico, la innovación y el equilibrio de la cadena de comercialización en el sector pesquero y de la acuicultura en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y se convocan para 2021*”.

[11] F.H. Fisher y V.P. Simmons, “Sound absorption in sea water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, n° 3, pp. 558–564, 1977.

[12] P. Welch, “The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, n° 2, pp. 70–73, 1967.

[13] P.H. Rogers, A.D. Hawkins, A.N. Popper, R.R. Fay, y M.D. Gray, “Parvulescu Revisited: Small Tank Acoustics for Bioacousticians”, en *The Effects of Noise on Aquatic Life II*, A. N. Popper y A. Hawkins, Eds: Springer, 2016, pp. 933–941.

[14] Europ. Assoc. for Pump Manufact. & Hydraulic Instit., *Variable speed pumping: A guide to successful applications*, Elsevier, 2004.

7. REFERENCIAS

[1] U.F. Mustapha, A. Alhassan, D. Jiang, y G. Li, “Sustainable aquaculture development: a review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA)”, *Reviews in Aquaculture*, vol. 13, n° 4, pp. 2076–2091, 2021.

[2] S.G. Conti, P. Roux, C. Fauvel, B.D. Maurer, y D. A. Demer, “Acoustical monitoring of fish density, behavior, and growth rate in a tank”, *Aquaculture*, vol. 251, n° 2–4, pp. 314–323, 2006.

[3] D. Li, Z. Du, Q. Wang, J. Wang, y L. Du, “Recent advances in acoustic technology for aquaculture: A review”, *Reviews in Aquaculture*, pp. 1–25, 2023.

[4] R. Mallekh, J.P. Lagardère, J.P. Eneau, y C. Cloutour, “An acoustic detector of turbot feeding activity”, *Aquaculture*, vol. 221, n° 1–4, pp. 481–489, 2003.

[5] A.N. Bart, J. Clark, J. Young, y Y. Zohar, “Underwater ambient noise measurements in aquaculture systems: a survey”, *Aquacultural Engineering*, vol. 25, n° 2, pp. 99–110, 2001.

[6] G.M. Wenz, “Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, n° 12, pp. 1936–1956, 1962.

[7] C.L. Piggott, “Ambient Sea Noise at Low Frequencies in Shallow Water of the Scotian Shelf”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 36, n° 11, pp. 2152–2163, 1964.

[8] W.A. Kuperman y P. Roux, “Underwater acoustics”, en *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007, pp. 149–206.

[9] T.G. Leighton, “Fundamentals of underwater acoustics”, en *Fundamentals of Noise and Vibration*, CRC Press, 1998.

[10] N. Cochard, J.L. Lacoume, P. Arzelies, y Y. Gabillet, “Underwater acoustic noise measurement in test tanks”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, n° 4, pp. 516–522, 2000.

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RUIDOS PROPIOS DE UN GLIDER PARA APLICACIONES DE MONITORIZACIÓN DE RUIDO SUBMARINO SEGÚN LA DIRECTIVA 2008/56/EC (MSFD)

Andrés Felipe Arias Alfonso^{1}*
Neus Pérez Gimeno²
Sergio Morell Monzó¹
Isabel Pérez Arjona¹
Víctor Espinosa Roselló¹

¹ Universidad Politécnica de Valencia

² Universidad de Cádiz

RESUMEN

Los gliders son vehículos autónomos que se impulsan mediante el cambio en su flotabilidad en lugar de hacerlo con hélices. Esto hace que sean vehículos silenciosos, lo cual los ha convertido en una opción de interés para aplicaciones de monitorización acústica en el océano. Sin embargo, los mecanismos y sensores del vehículo generan ruidos que pueden afectar los datos acústicos registrados. En este artículo, se investiga los ruidos propios de un glider y su aplicabilidad para mediciones de ruido ambiental según la MSFD. Se realizó una caracterización mediante los datos obtenidos en una campaña de medición en el mar al sur de la isla de Gran Canaria, España. Para esto, se utilizó un glider Slocum G2 de Teledyne y un sistema PAM OceanObserver de JASCO. Se analizó la posible influencia de estos en las bandas por tercios de octava relacionadas con el descriptor D11.2 de la Directiva 2008/56/EC (MSFD) para ruido de tipo continuo. Los resultados mostraron que existe una incidencia directa de los ruidos generados por los mecanismos del vehículo principalmente en la banda de 63 Hz. Se demostró que al realizar la extracción de los ruidos, se logra mitigar la influencia de los ruidos en las bandas por tercios de octava de interés.

ABSTRACT

In the present work, a characterization of the noises of a glider was carried out using the data obtained in a measurement campaign in the sea south of the island of Gran Canaria, Spain. For this, a Slocum G2 glider from Teledyne and a JASCO OceanObserver PAM system were used. The possible influence of these on the third-octave bands related

to descriptor D11.2 of Directive 2008/56/EC (MSFD) for continuous noise was analyzed. The results showed that there is a direct impact of the noise generated by the vehicle mechanisms mainly in the 63 Hz band. It was shown that by extracting the noise, the influence of the noise in the bands is mitigated by thirds of octave of interest.

Palabras Clave— Ruidos propios del glider, PAM, MSFD.

1. INTRODUCCIÓN

Los gliders o planeadores subacuáticos, son plataformas autónomas móviles las cuales se impulsan a través del océano mediante el cambio en su flotabilidad en lugar de hacerlo mediante una hélice. Al cambiar la flotabilidad del vehículo, con ayuda de las alas se transforma la fuerza vertical en desplazamiento horizontal (hacia adelante) [1]. Cuando posee una flotabilidad negativa, el glider desciende hasta una profundidad máxima pre-definida a partir de la cual cambia a una flotabilidad positiva y empieza de nuevo el ascenso hasta una profundidad mínima pre-establecida. Esto hace que este tipo de vehículos sean considerados silenciosos y de bajo consumo energético en comparación de otras plataformas móviles que se impulsan a través de hélices, por ejemplo, los ROV's o algunos AUV's [1][2][3][4]. Gracias a estas características "silenciosas" de este tipo de vehículos se han convertido en una de las opciones más interesantes para la implementación de sistemas de monitoreo acústico pasivo (PAM) [3].

Durante su desplazamiento, el glider realiza una trayectoria tipo diente de sierra, lo cual permite realizar un muestreo tanto horizontal como verticalmente [2]. El glider

* **Autor de contacto:** anaral3@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

se programa para que al realizar un cierto número predefinido de perfiles tipo diente de sierra o “yo’s” (descenso y ascenso), salga a la superficie con el fin de transmitir y recibir diferentes datos de navegación [4]. Mediante esta comunicación, se puede saber cuáles son las condiciones de los diferentes sistemas críticos del vehículo. También, el glider puede fijar su posición con el fin de recalcularse el rumbo de la misión. Además, el operador del vehículo también puede realizar cambios en el rumbo y se puede realizar la transmisión en tiempo real de los datos de los sensores instalados [5]. De esta forma, cuando se instalan sistemas PAM en gliders se tiene la posibilidad de medir la variabilidad del ruido a lo largo de grandes extensiones de un área de estudio en el océano [6]. También, al variar su posición, estos vehículos se consideran mínimamente invasivos en la detección de cetáceos debido a su reducida huella acústica y su reducida velocidad (aprox. $0,27 \text{ m/s}$). Por lo tanto, no generan impactos negativos al momento de realizar tareas de monitoreo acústico pasivo [7].

A la hora de evaluar el uso de un planeador subacuático o glider integrando un sistema PAM, es necesario considerar el ruido propio inherente al sistema de propulsión del vehículo y el efecto que este puede tener sobre los datos adquiridos. Al no poseer turbina o hélice, el glider posee un bajo ruido en condiciones normales de operación en comparación de otros vehículos submarinos. Aun así, los ruidos propios producidos por el glider pueden ser registrados por el sistema PAM instalado a bordo, potencialmente enmascarando los ruidos externos de origen antropogénico, biológico, y natural que se encuentren en el ambiente marino [2][6].

Se ha podido determinar que las principales fuentes del ruido del glider están relacionadas con el movimiento del pistón de bomba de flotabilidad, el movimiento del paquete de baterías asociado al control de pitch, el movimiento del timón para las correcciones de trayectoria, y el inflado de la vejiga de aire en superficie. En el caso de los sensores, los que principalmente pueden producir ruidos son el perfilador de profundidad, temperatura y conductividad o CTD, y el altímetro [1][7]. Por otro lado, se tiene que el ruido hidrodinámico es mínimo cuando el glider se desplaza a velocidades menores a $0,5 \text{ m/s}$. Por este motivo, los diferentes mecanismos móviles del glider son los principales generadores del ruido propio de este tipo de vehículos. Estos ruidos se presentan brevemente cuando los mecanismos de ajuste de flotabilidad y trayectoria son activados durante el desplazamiento del vehículo [2].

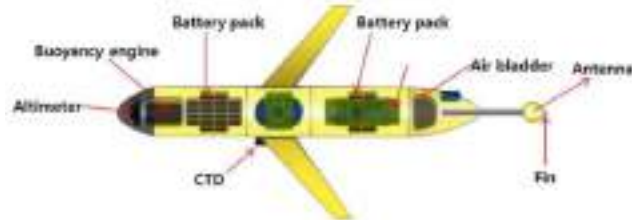


Figura 1. Componentes básicos del glider. Tomado de [2].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Instrumentación

En el presente estudio, se utilizó el sistema PAM OceanObserver de la empresa JASCO Applied Sciences, integrado a un planeador subacuático SLOCUM G2 de la empresa Teledyne Webb Research, ambos disponibles a través del Servicio Integral de Tecnología Marina (SITMA) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

El glider utilizado tiene una capacidad máxima de operación en profundidad de 1000 m y es propulsado por el cambio de flotabilidad logrado a través de una vejiga de aceite ubicada en la sección frontal del vehículo. La fuente de alimentación del vehículo se da a través de un paquete de baterías de litio que tienen una vida útil entre 4 y 12 meses, según las condiciones de operación. La velocidad promedio horizontal del glider para un ángulo de 45° de ataque es de aproximadamente 35 m/s . El vehículo tiene un peso de 54 kg y cuenta con sensores de CTD, GPS, modem de Radio Frecuencia, altímetro y el sistema de comunicación Iridium, contando además del sensor acústico.

Con relación al sistema de monitorio utilizado, en la sección dorsal media del planeador se tiene instalado el hidrófono M36 de la empresa GEOSPECTRUM con una sensibilidad de $-165 \text{ dBV ref } 1 \mu\text{Pa}$ a 250 Hz . Este se encuentra conectado mediante un cable al muelle científico del glider, lugar en donde se ubica la placa madre del sistema PAM Ocean Observer de JASCO. El preamplificador del sistema PAM utilizado posee un piso de ruido eléctrico de aproximadamente $30 \text{ dB ref } 1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$. La frecuencia de muestreo utilizada por el sistema fue de 512 kHz y con una resolución de 24 bits. El sistema PAM Ocean Observer tiene una capacidad de almacenamiento de 6 TB (12 tarjetas SD de 512 GB de espacio interno). El convertidor Análogo – digital o ADC utilizado por el sistema, está compuesto por un filtro antialiasing de tercer orden a una frecuencia de corte de 200 kHz , y con una ganancia fija de 0 dB. La respuesta en frecuencia del ADC va desde los $2,4 \text{ Hz}$ hasta los 200 kHz , con una caída de aproximadamente 3 dB en las frecuencias de corte mencionadas [8].



Figura 2. Glider Slocum G2 de Teledyne Webb Research con el sistema PAM OceanObserver de JASCO Applied Science instalado en la sección media donde se ubica el muelle científico. Se puede apreciar en la imagen el hidrófono M36 instalado en la parte dorsal del glider.

2.2. Campaña de medición realizada en el mar

Para la caracterización de los ruidos propios del glider bajo condiciones normales de operación, se realizó una prueba en mar abierto al sur de la isla de Gran Canaria. La zona de medición seleccionada se encuentra al sur de la zona de protección declarada por la Red Natura 2000. Se denomina como la franja marina de Mogán y es protegida por la Orden ARM/2417/2011, por la que se declaran zonas especiales de conservación los lugares de importancia comunitaria marinos de la región biogeográfica Macaronésica de la Red Natura 2000 y se aprueban sus correspondientes medidas de conservación (Figura 3) [9]. La medición se realizó por fuera de la Plataforma continental aproximadamente a 15 km del puerto de Puerto Rico. La batimetría promedio de la zona de medición estuvo alrededor de los 1000 metros.

El glider fue desplegado en la zona de medición en la mañana del 08/04/21 y fue recogido en la mañana del 09/04/21, para una duración total de aproximadamente 24 horas. Durante la misión, el glider realizó un total de diez salidas a superficie. Antes de cada llegada a superficie para establecer comunicación con el satélite y realizar el envío y recepción de datos, el glider realizó 3 “yo’s” siguiendo una trayectoria vertical tipo diente de sierra (Figura 4). La profundidad mínima alcanzada por el glider durante su navegación fue de 50 m, y alcanzó una profundidad máxima 600 m. Esta profundidad fue determinada previamente teniendo en cuenta las características batimétricas del fondo marino en la zona de medición, en donde las profundidades se encontraban en promedio a 1000 m. El glider se desplazó a una velocidad horizontal promedio de $0,35 \text{ m/s}$ cubriendo una distancia de aproximadamente 16,2 km en la horizontal. Durante cada salida a superficie, el glider demoró en promedio 32 minutos en superficie mientras se realizaba la comunicación con el satélite. En estos intervalos de tiempo, el sistema PAM OceanObserver detuvo automáticamente la grabación, y, por lo tanto, no se tuvo registro de datos acústicos durante estos intervalos de tiempo.



Figura 3. Zona de protección declarada por la Red Natura al sur de la isla de Gran Canaria (morado) y zona de medición (amarillo).

Durante la misión estuvieron activos todos los sensores y mecanismos del glider. El sensor CTD estuvo activo durante toda la misión, y por lo tanto, el ruido generado por este sensor estuvo presente en todos los datos registrados. El control de pitch fue ajustado para mantener un ángulo fijo de ascenso y descenso durante la navegación, impidiéndole al vehículo ajustar el ángulo de forma automática para corregir su trayectoria durante la navegación. Por otra parte, el sistema de adquisición de datos se ajustó para grabar con una frecuencia de muestreo de 512 kHz. De esta forma, se obtuvieron aproximadamente 70 GB de datos acústicos registrados durante la misión. Cada archivo de audio de una duración de 30 min (2,76 GB), con excepción de los archivos grabados cuando el glider llegó a superficie, cuya duración fue en promedio de 15 min antes de detener la grabación para la transmisión de datos (aprox. 10% de los datos de toda la medición).

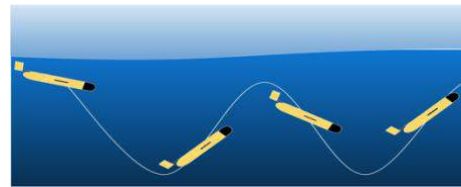


Figura 4. Movimiento vertical característico de los planeadores subacuáticos o gliders. A cada descenso y posterior ascenso se le denomina “yo”. Perfil tipo diente de sierra. Tomado de [10].

2.3. Procesamiento de los datos

Los datos registrados durante las mediciones se descargaron en una computadora y se procesaron mediante MATLAB. Para obtener una descripción de las señales adquiridas en el dominio del tiempo y de la frecuencia, se obtuvieron los espectrogramas para segmentos de 3 minutos. Mediante los espectrogramas es posible obtener una descripción general de los diferentes eventos acústicos registrados durante las grabaciones. Los eventos con mayor densidad de energía pueden ser claramente identificados en el espectrograma según sea la paleta de colores seleccionada. Mediante el análisis gráfico de los espectrogramas, es posible estudiar las características de los datos acústicos registrados con el sensor, específicamente, los ruidos emitidos por los propios mecanismos y sensores del glider. Para obtener los espectrogramas, se aplicó una ventana tipo kaiser con una resolución en frecuencia de 5 Hz, lo que implica una ventana de un tamaño de 102400 muestras. Para cada ventana se calculó la STFT, con un solapamiento de 50 % entre los segmentos. Luego, a partir de los valores obtenidos para la STFT, se obtuvo la densidad espectral de potencia de las señales (PSD).

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RUIDOS PROPIOS DEL GLIDER PARA LA PRUEBA REALIZADA EN EL MAR

Durante toda la campaña de medición el sensor CTD estuvo activo. Este sensor produce un ruido durante toda la medición, y, por lo tanto, fue necesario realizar un análisis detallado de las características del ruido producido por este sensor. Así, la combinación del ruido ambiental y el ruido producido por el CTD se considera para el presente análisis como el ruido de fondo de referencia para la comparación con los otros ruidos producidos por los sensores y mecanismos del glider.

3.1. Análisis del ruido generado por el CTD

De los espectros en frecuencia obtenidos para el ruido generado por este sensor bajo las diferentes 3 condiciones (Figura 5), es posible determinar que se conserva una estructura similar en la respuesta en frecuencia en el rango entre 0.1 y 10 kHz. Por otro lado, por debajo de este rango se evidencia una variación del espectro obtenido para este ruido en profundidad en comparación con las otras dos condiciones analizadas. Principalmente, se observa que, para el ruido del CTD generado en profundidad máxima, los niveles en el rango de baja frecuencia son mucho mayores que los obtenidos para el ruido generado durante el descenso/ascenso y en superficie. Aun así, no es posible determinar si estos niveles sonoros se deben al ruido generado por el CTD o son los niveles de ruido ambiental característicos de la zona de medición y son generados por otro tipo de fuentes de ruido, especialmente los ruidos de origen geodinámico [6].

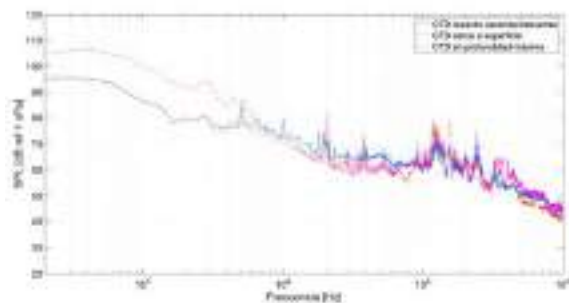


Figura 5. Comparación del promedio de los espectros en frecuencia del ruido generado por el CTD bajo diferentes condiciones: durante el ascenso/descenso, cerca de la superficie, y en profundidad máxima.

3.2. Análisis de los ruidos propios del glider durante el ascenso y el descenso

En el ascenso y el descenso del glider durante la prueba realizada en el mar, se pudieron detectar diferentes tipos de ruidos de los cuales fue posible identificar el ruido generado por el movimiento de la aleta del timón en popa (Figura 6a), el ruido generado por la bomba de aire (Figura 6b), y el ruido generado por el altímetro (Figura 6a). Además, se presentó también en diferentes ocasiones un ruido de tipo impulsivo y de origen artificial del cual no fue posible identificar el mecanismo que lo produjo (Figura 6a). Los ruidos se presentaron de forma aleatoria sin presentar ningún tipo de periodicidad o patrón temporal. Durante la navegación del glider, el ruido que se detectó un mayor número de veces fue el del movimiento de la aleta de popa, seguido por el ruido impulsivo de origen desconocido. El ruido que se detectó una menor cantidad de veces fue el generado por la bomba de aire, el cual se presentó de manera ocasional y no fue constante dentro de las mediciones realizadas. Por último, el ruido generado por el altímetro solo se presentó en algunos intervalos de tiempo de algunos de los registros y el tiempo promedio en el que estuvo presente fue de 30 segundos.

El ruido generado por el movimiento de la aleta de popa es de corta duración (< 1s) y su contenido energético se ubica principalmente en el rango de baja frecuencia, entre 10 y 100 Hz. En la Figura 7a se puede observar que la frecuencia fundamental de este ruido se encuentra alrededor de los 28 Hz, alcanzando un nivel de aproximadamente 118 dB. En el caso del ruido generado por la bomba de aire fue de corta duración (< 1s) y no duró el tiempo suficiente para alcanzar un estado estacionario. En la Figura 6b se observa que a partir de los 20 Hz hasta los 6 kHz los niveles del ruido generado por la bomba de aire son mayores a los niveles del ruido de fondo de referencia. Por último, el ruido producido por el altímetro produce un ruido transitorio repetitivo de banda ancha similar a los “clicks” utilizados por los delfines para tareas de eco localización (Figura 7b) [1]. Este ruido tiene impacto a partir de los 500 Hz hasta los 10 kHz, para el rango de frecuencia analizado. Por debajo de los 500 Hz, los niveles que predominan son los generados por la combinación del ruido ambiente propio característica de la zona de medición, y el ruido generado por el CTD.

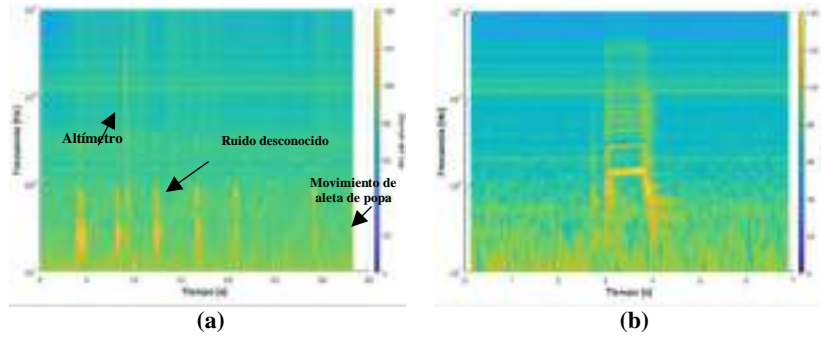


Figura 6. Espectrogramas de 2 segmentos de audio de las grabaciones realizadas en la campaña de medición en los cuales se pueden observar los ruidos detectados durante el ascenso y el descenso. (a) segmento en donde se presentaron ruidos de la aleta del timón de la cola, un ruido de origen desconocido, y el altímetro; (b) ruido generado por la bomba de aire.

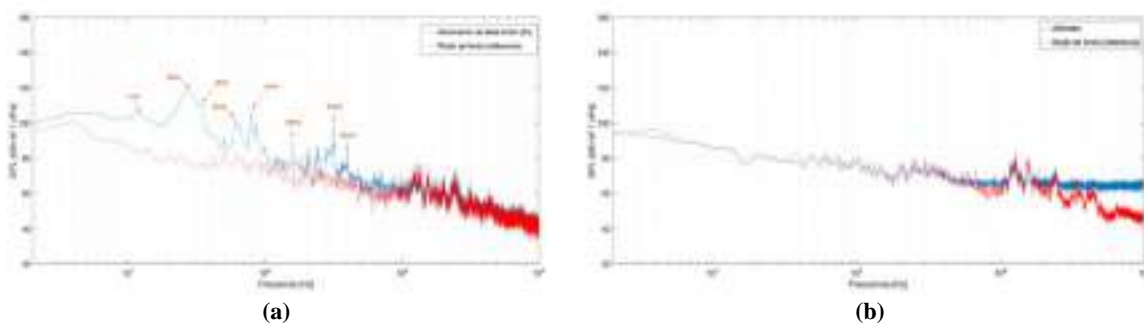


Figura 7. Espectros en frecuencia de los ruidos generados por el glider durante el ascenso y el descenso. (a) ruido generado por el movimiento de la cola del timón en popa (fin); (b) ruido generado por el altímetro

3.3. Análisis de los ruidos propios del glider durante el ascenso y el descenso

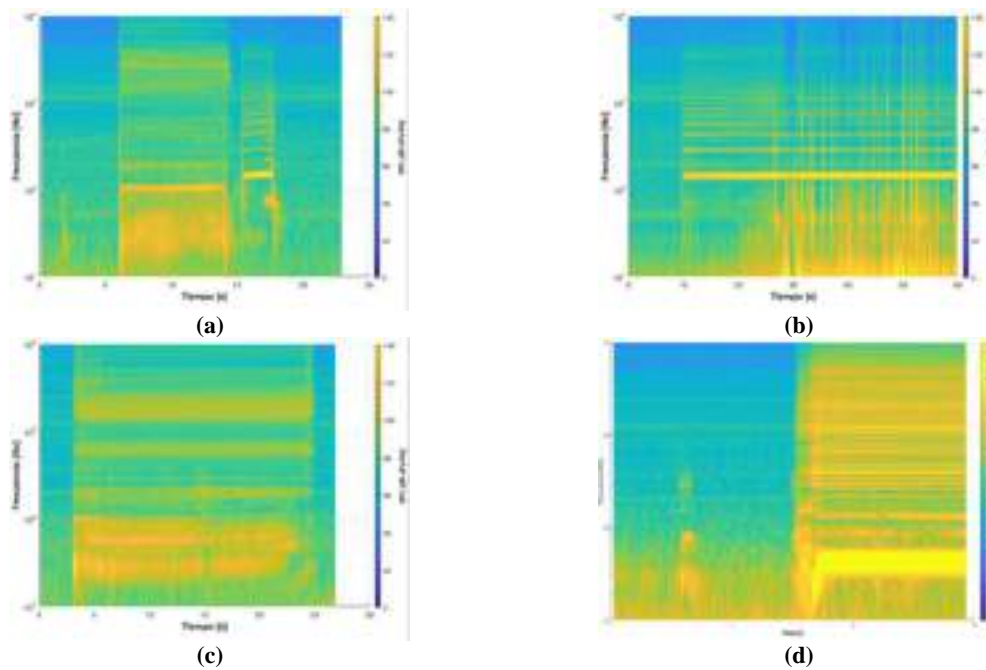


Figura 8. Espectrogramas de los ruidos detectados en profundidad máxima y mínima, y en superficie. Arriba - ruidos generados en superficie: bomba de aire y cambio de pitch (a) y bomba de aire (b). Abajo - ruidos generados en profundidad máxima o mínima: cambio de pitch (c) y bomba de flotabilidad (d).

La bomba de aire se activó cada vez que el glider llegó a superficie. Para el ruido generado por el llenado de aire de la bomba de aire, se obtuvieron niveles cercanos a los 120 dB en su frecuencia fundamental que se encuentra alrededor de los 150 Hz. También, se pueden apreciar armónicos superiores a la frecuencia fundamental que llegan hasta los 10 kHz, con picos de nivel por encima de los 100 dB. Además, se evidencia un alto contenido energético en las frecuencias por debajo de los 10 Hz, alcanzando niveles por encima de los 120 dB en las frecuencias por debajo de los 5 Hz (Figura 8b).

La bomba de flotabilidad se activó cada vez que el glider alcanzó la profundidad máxima y mínima durante su desplazamiento. El ruido generado por la bomba de flotabilidad es el ruido que tiene mayor incidencia en términos de nivel sonoro en comparación con los demás ruidos detectados. Este ruido tuvo incidencia sobre todo el ancho de banda considerado para el presente análisis (0 a 10 kHz), estando 30 dB en promedio por encima del ruido de fondo de referencia. La frecuencia fundamental de este ruido se encuentra alrededor de los 44 Hz, alcanzando un nivel cercano a los 150 dB y presentando diferentes armónicos a partir de esta frecuencia por encima de los 120 dB (Figura 8d).

El mecanismo asociado al cambio de pitch en el glider se activó en profundidad máxima, mínima y cada vez que el glider salió a superficie. El ruido generado por el cambio de pitch posee un ancho de banda que afecta todo el rango de frecuencias considerado (Figura 8a y 8c). En el rango entre 25 y 125 Hz, se pueden encontrar picos de nivel por encima de 100 dB, alcanzando diferencias de hasta 30 dB con respecto a los niveles del ruido de fondo de referencia.

3.4. Comparación de niveles obtenidos con ruido y sin ruidos del glider para las bandas de interés de la MSFD 11.2

Con el fin de analizar el impacto que pueden tener ruidos generados por el glider en los niveles de ruido obtenidos para los indicadores del ruido ambiental submarino en las bandas por tercios de octava de 63 y 125 Hz, se obtuvieron los niveles de las señales registradas mediante el sistema PAM incluyendo los ruidos propios del glider, y los niveles luego de extraídos estos ruidos de las señales. Además, se incluyeron las bandas por tercios de octava de 2 y 5 kHz con el fin de seguir las recomendaciones dadas desde los proyectos QUIETMED y BIAS [11][12].

En la **Error! Reference source not found.** se puede observar que la banda de 63 Hz es la que se ve afectada en mayor medida por los mecanismos generadores de ruido activados durante la navegación, especialmente por la activación de la aleta de popa la cual es la que se presenta con mayor frecuencia durante el ascenso y descenso del planeador. En el caso de la banda de 125 Hz, solo se presentó un instante de tiempo en el que los niveles de la señal que

contiene los ruidos del glider son mayores a los niveles obtenidos para la señal sin ruidos propios. Esto muestra que el impacto de los mecanismos generadores de ruido activados durante este segmento de audio es mucho menor en esta banda en comparación con la banda de 63 Hz.

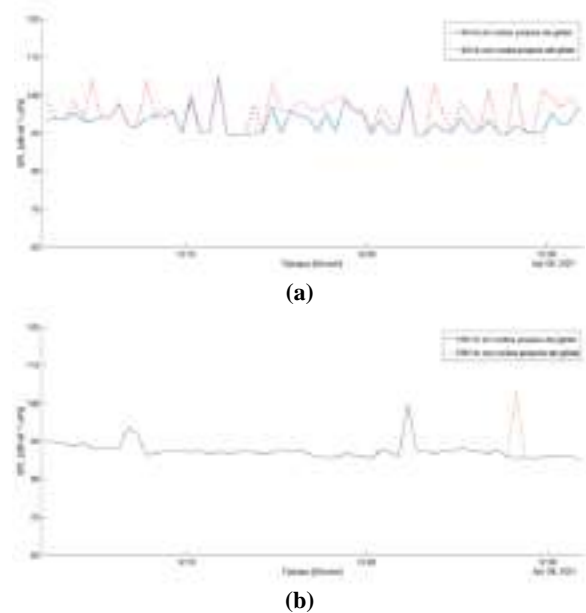


Figura 9. Niveles de ruido obtenidos de las señales con y sin ruidos del glider para las bandas por 1/3 de octava de 63 Hz (a) y 125 Hz (b). Niveles correspondientes al archivo de audio de 30 minutos de duración, grabado el 08/04/2021 desde las 12:02:17 a las 12:32:17 (hora local) durante la prueba realizada en el mar al sur de la isla de Gran Canaria

4. CONCLUSIONES

Para este trabajo se propuso una caracterización acústica de los ruidos emitidos por los diferentes mecanismos y sensores de un glider Slocum G2 de Teledyne Webb Research, con el fin de evaluar la viabilidad de este tipo de plataformas para la evaluación del ruido ambiental.

Para los ruidos generados por los diferentes mecanismos y sensores del vehículo, se evidenció que durante los momentos en los que en glider se encuentra en profundidad máxima, mínima, y en superficie, es imposible obtener datos acústicos útiles de fuentes de ruido diferentes al propio glider. Durante estos intervalos de tiempo, se activan los mecanismos de la bomba de flotabilidad, la bomba de aire, y el control de pitch. Todos estos mecanismos presentan incidencia sobre todas las bandas por tercios de octava de interés para el cálculo de los indicadores de ruido (63, 125, 2000, y 5000 Hz). De esta manera, los niveles obtenidos en las bandas de interés mientras estos mecanismos estén activos serán básicamente los niveles de ruido de cada uno de estos mecanismos y no los emitidos por otras posibles fuentes de interés que componen el ruido ambiente submarino.

Por otro lado, durante toda la prueba realizada en el mar, el sensor CTD estuvo activo. Se realizó un análisis del ruido emitido por este sensor, caracterizándolo durante los tres momentos de interés planteados: ascenso/descenso, profundidad máxima, y cerca de la superficie. Aunque hubo una variación en los niveles obtenidos por debajo de los 100 Hz en los tres momentos de interés, el ruido conservó su espectro característico. De esta manera, fue posible identificar las componentes principales del ruido emitido por el CTD. Además, se analizó la posible incidencia del ruido generado por el CTD en los niveles obtenidos en las bandas por tercios de octava de interés. Según el espectro del ruido, se observó que existe una posible incidencia sobre estas bandas, con lo cual, no es posible determinar si este ruido puede enmascarar posibles fuentes de ruido ambiental submarino. Para poder tener una verdadera referencia de la afectación generada por este sensor en los niveles de ruido obtenidos en las bandas de interés, es necesario realizar una medición con este sensor apagado, o tener datos de una estación fija en la misma zona de medición para poder comparar los niveles obtenidos y determinar si existe o no una real incidencia sobre estas bandas.

Durante la etapa de ascenso y descenso, se pudo comprobar que se generan aleatoriamente ruidos de los diferentes mecanismos. El que se activó con mayor frecuencia fue el de la aleta del timón en popa, produciendo un ruido de corta duración. La activación de la bomba de aire fue ocasional y de también de corta duración. Según las características en frecuencia encontradas de los ruidos emitidos por estos mecanismos, se pudo evidenciar que existe una incidencia sobre las bandas por tercios de octava de interés, y, por lo tanto, estos ruidos deben ser filtrados o extraídos para evitar que influyan en los niveles de ruido ambiental obtenidos a partir de las mediciones realizadas. Para este trabajo, esto se logró mediante la extracción automática de los segmentos contaminados con los ruidos propios del glider.

En el caso del ruido de origen desconocido, según la cantidad de veces que se presentó, se da la posibilidad de que sea generado por algún mecanismo interno del glider. Este ruido no posee ningún tipo de patrón temporal ni parece estar asociado a alguno de los mecanismos generadores de ruido analizados desde el presente trabajo. También cabe la posibilidad de que estos ruidos sean provocados por el golpe del sensor con sedimentos presentes en el agua mientras el glider se desplaza.

Mediante la comparación realizada entre los niveles de ruido obtenidos en las bandas por tercios de octava de interés con y sin los ruidos generados por el glider durante la navegación, se pudo encontrar que, para un tiempo de integración de 30s, los ruidos del glider tienen incidencia en los indicadores de ruido obtenidos, especialmente para la banda de 63 Hz que es en la que el ruido generado por la aleta del timón tiene mayor impacto. En el caso de las demás bandas (125, 2000 y 5000), aunque el impacto es menor,

puede existir una influencia de los ruidos propios del glider en los niveles de ruido ambiental.

5. REFERENCIAS

- [1] J.-H. Lee, S.-H. Ko, S.-K. Jung, y J.-W. Hyeon, "Tertiary Waves Measured during 2017 Pohang Earthquake Using an Underwater Glider", *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, 2019.
- [2] L. Liu y L. Xiao, "Extraction and analysis of line spectrum characteristics of underwater glider self-noise", en *2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2017, pp. 1-4.
- [3] C. Jiang, J. Li, y W. Xu, "The Use of Underwater Gliders as Acoustic Sensing Platforms", *Appl. Sci.*, vol. 9, n.o 22, 2019, doi: 10.3390/app9224839.
- [4] H. Matsumoto, J. H. Haxel, R. P. Dziak, D. R. Bohnenstiehl, y R. W. Embley, "Mapping the sound field of an erupting submarine volcano using an acoustic glider", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, n.o 3, pp. EL94-EL99, 2011, doi: 10.1121/1.3547720.
- [5] N. O. Center, "Gliders", <https://www.noc.ac.uk/facilities/marine-autonomous-robotic-systems/gliders>. (accedido feb. 25, 2021).
- [6] T. K. Chandrayadula, C. W. Miller, y J. Joseph, "Monterey Bay ambient noise profiles using underwater gliders", *Proc. Meet. Acoust.*, vol. 19, n.o 1, p. 70031, 2013.
- [7] J. Sun et al., "Self-Noise Spectrum Analysis and Joint Noise Filtering for the Sea-Wing Underwater Glider Based on Experimental Data", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 42960-42970, 2020.
- [8] J. Moloney et al., "Observer/AMAR G4 Passive Acoustic Monitoring System for Autonomous Maritime Observation", en *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, 2018, pp. 1-9.
- [9] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, Orden ARM/2417/2011, de 30 de agosto, por la que se declaran zonas especiales de conservación los lugares de importancia comunitaria marinos de la región biogeográfica Macaronésica de la Red Natura 2000 y se aprueban sus correspondientes medidas de conser. España, 2011, p. 751.
- [10] C. Hockley y B. Butka, "Going Deep to Go Far: How Depth Impacts Seaglider Range", *Earthzine*, 2011. <https://earthzine.org/going-deep-to-go-far-how-dive-depth-impacts-seaglider-range/#:~:text=Seaglider range versus operational depth&text=Typically%2C to complete one cycle,an hour of forward motion>. (accedido feb. 05, 2021).
- [11] Millares, R., A. Popit, G. Zupancic, P. Ruiz, A. Novelino, y M. Tasker, "D3.2 Best practices guidelines on signal processing algorithms for the pre-processing of the data and for obtaining noise indicators", 2018.
- [12] K. Betke et al., "BIAS STANDARDS FOR SIGNAL PROCESSING AIMS, PROCESSES AND RECOMMENDATIONS", 2015.

ANALYSIS OF THE UNDERWATER SOUNDSCAPE USING ECOACOUSTIC INDICES: THEORETICAL COMPILATION OF ECOACOUSTIC PARAMETERS

Bautista Parra, Nerea^{1}; Affatati, Alice²; Poveda Martínez, Pedro^{1*}; Carbajo San Martín, Jesús^{1*};
Ramis Soriano, Jaime^{1,2*}*

¹ Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante

² Geophysics Research Section 1, National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (OGS),
Trieste, Italy

ABSTRACT

Ecoacoustics deals with the study of the properties, evolution, and function of sounds in the environment. Ecoacoustics analysis is becoming an important way to quantify the ecological aspects of animal communication in a given terrestrial or underwater landscape (also referred to as “soundscape”). This approach relies on the importance of the identification of the different acoustic signals that occur in the environment and the ability to analyse how they affect the soundscape and the individuals living in it. This soundscape is complex and requires procedures to transform the data collected into information that is useful for understanding the environment. The purpose of this work is to provide a theoretical compilation of ecoacoustic indices that facilitate the understanding and study of the landscape, to be applied later, in the experimental part, in an underwater environment and to discuss the results obtained.

Keywords— ecoacoustic indices, anthropophony, biophony, soundscape, underwater acoustics.

1. INTRODUCTION

Ecoacoustics, known as the study of environmental sound, is becoming an important tool for quantifying ecological aspects of the landscape and is useful for investigating critical ecological issues such as biodiversity loss and even climate change [1].

Therefore, ecoacoustics is an expanding field that has great potential for biodiversity monitoring and is also an interesting alternative to the visual study of the landscape. Visual analysis and observations of the landscape have been

used in geography since its beginnings, as they are the most direct way of studying the physiognomy of the Earth. However, in recent years, researchers have implemented different approaches that recognize other sensory channels which compensate the importance of what is seen [2]. Talking about sound, the soundscape has biological (“biophony”), geological (“geophony”), and anthropogenic (“anthropophony”) contributions [3].

Nowadays, ecoacoustic analysis is an integral part of research into the ecological aspects of the landscape. The convenience and low cost of acoustic recording facilitates the accumulation of enormous amounts of sound data, that are difficult to listen to in their entirety. Sound acquisition systems provide a time series of recordings that can be transformed into the correct metrics and subsequently analysed to examine the acoustic temporal patterns present in different environments [4].

Research in this area has led in recent years to the birth of methods that improve the understanding and relationship of signals collected during biological and ecological processes. In this way, parameters and indices which help in the characterization of the soundscape emerge. These, among others, are the ecoacoustic indices. These indices have a great potential to expand the ways of monitoring underwater ecosystems, solving the lack of algorithms that limit such acoustic monitoring and being at the same time a non-invasive method, unlike traditional approaches.

Passive Acoustic Monitoring (PAM) is the technique mainly used to record soundscapes and provides a way to study marine organisms in their natural environment [5], without introducing any interference or stress factor or altering the soundscape.

In this work, an initially theoretical compilation of those ecoacoustic indices with a greater presence in underwater environments [1] will be given to understand how they are

* **Contact author:** nbp27@alu.ua.es; pedro.poveda@ua.es; jesus.carbajo@ua.es; jramis@ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

used and how they are applied to a sound environment through acoustic recordings, which are studied in the second part of this work.

2. ECOACOUSTIC INDICES

Ecoacoustic indices are mathematical functions designed to evaluate certain aspects of biodiversity and the soundscape [6]. The main use of these indices is exploited in ecological studies, so they can also be described as indicators of sound ecology that assess the spectral and temporal variation of sound emissions in the landscape, either terrestrial or underwater.

Numerous indices have been developed over time to evaluate the environment and analyse facets of the diversity of animal and plant communities. It is convenient to know that some of these indices mainly differentiate three types of sound emitted according to its source or origin. Bernard Krause [3], musician and ecologist, differentiated these type of sounds as follows:

- **Geophony:** natural sounds of non-biological origin, such as the sea, water currents, wind, earthquakes.
- **Biophony:** sounds produced by living organisms in a given environment or habitat.
- **Anthropophony:** sounds generated by humans and the activities they perform in the environment. These sounds can range from more controlled sounds, such as music, theatre, or language, to more incoherent and chaotic sounds, such as noise.

The indices aim to quantify richness, evenness, regularity, divergence, or rarity in species abundance, among many other traits. To facilitate the classification of the indices developed so far, they may be differentiated into α and β indices [6].

3. α INDICES

The α indices are those related to the number of entities (also known as richness) and the relative abundance of each entity (also known as evenness). Therefore, these types of indices aim to represent different attributes of an environment or habitat. Examples of these are richness, complexity, evenness, or heterogeneity of an acoustic community or soundscape. There are three categories:

- **Intensity:** indices that analyse the sound sample from the amplitude or intensity between signals.
- **Complexity:** indices that estimate a level of heterogeneity with the signal spectrum (frequency) or amplitude envelope (time).
- **Type of soundscape:** indices that consider the relationship between biophony, geophony, and anthropophony [3] of a soundscape.

The α indices used in the experimental part are the most used in underwater acoustics, which are shown in Table 1.

Table 1. α indices used in the experimental part of the work.

Name	Principle	Ref.
Acoustic Complexity Index (ACI)	Spectrogram complexity	[7]
Normalised Difference Soundscape Index (NDSI)	Ratio of anthropophony to biophony	[8]
Acoustic Entropy Index (H)	Envelope and spectrum complexity	[9]
Temporal Entropy (H_t)	Envelope complexity	[9]
Spectral Entropy (H_f)	Spectrum complexity	[9]
Acoustic Richness (AR)	Envelope complexity and intensity	[10]
Median of amplitude envelope (M)	Median of amplitude envelope	[10]
Acoustic Diversity Index (ADI)	Spectrum complexity	[11]

These indices, as mentioned below, may be affected by factors such as background noise (transient or permanent), relative loudness, temporal and/or frequency overlap between sounds from different sources. However, these indices are the most used in research as they aim to give a single value to characterise a soundscape.

3.1. Acoustic Complexity Index (ACI)

The ACI [7] is the second most widely used index in underwater acoustics. It was first developed to produce a direct quantification of the complexity of the soundscape by measuring the intensity variations that occur throughout a sound recording, despite the presence of anthropogenic sound [12], in the different frequency bands. It provides greater value to signals with higher amplitude. These frequency bins are usually default to 1 kHz. ACI were originally used by researchers to analyse bird vocalisations.

The theoretical basis for this index is that biotic sounds are characterised by a high variability of intensity, whereas anthropogenic noise or geophonic sounds are usually of constant intensity. For example, in the terrestrial environment, both geophonic sound (wind, water...) and the sound of roads or air traffic are usually monotonous and of lower intensity than those produced by animals such as birds and amphibians., which is why the ACI assigns them lower values. The calculation of this index is made by adding the absolute difference between two adjacent intensity values from the intensity matrix obtained by means of a Short-Time Discrete Fourier Transform (STDFT).

$$\begin{matrix} & n_1 & \cdots & n_j & \cdots & n_J \\ \omega_1 & \left(\begin{matrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1J} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kj} & \cdots & a_{kJ} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ a_{K1} & \cdots & a_{Kj} & \cdots & a_{KJ} \end{matrix} \right) & & & & \end{matrix} \quad (1)$$

where a_{kj} are the Fourier coefficients obtained from the STDFT calculation, K is the number of frequencies, and J is the number of Fourier windows calculated in the signal.

If we consider a single frequency interval, which is a single row k of an STDFT matrix, the ACI calculates the derivative of the coefficients scaled by the sum of the coefficients as follows:

$$ACI_j = \sum_{j=1}^{J-1} \left(\frac{|a_{j+1} - a_j|}{\sum_{j=1}^J a_j} \right) \quad (2)$$

The calculation is processed for each frequency interval k , and the total is summed so that we obtain for a single time interval i . Starting from Eq. 2, we obtain this in the form:

$$ACI_{kj} = \sum_{k=1}^K ACI_j \quad (3)$$

Finally, if all the intervals i are considered, the final ACI is obtained.

$$ACI_{kji} = \sum_{i=1}^I ACI_{kj} \quad (4)$$

Theoretically, ACI is reliable for determining biodiversity, which will be lower with lower values of ACI.

3.2. Normalised Difference Soundscape Index (NDSI)

The NDSI was developed to estimate the relative amount of anthropogenic and biological components in a soundscape [8] and it categorizes the soundscape into anthropophony and biophony (or in some cases geophony and biophony). It compares the level of anthropogenic disturbance of the soundscape by calculating the ratio of human-generated to animal-generated acoustic components. It has originally been used in environments collected in an acoustic library. It has also been used in other terrestrial studies with forest vegetation, looking for minimum human intervention [13]. The ratio is calculated as follows:

$$NDSI = \frac{b-a}{b+a} \quad (5)$$

where b is the level of biophony and a is the level of anthropophony.

The soundscape energy level is separated into frequency components by evaluating the frequency spectrum (power

spectral density) with the Welch's method [14], which is discretised to a resolution of 1 kHz. Each component is the sum of the power based on 1 kHz frequency bins in each range.

The frequency ranges defined for each level consider mechanical signals (anthropophony) to occupy the frequency range from 1 to 2 kHz (sometimes also considered 0.2 to 1.5 kHz), while biophony occupies the bands from 2 to 8 kHz (sometimes also considered up to 11 kHz) [15, 16]. However, these values can be modified depending on the soundscape being explored and the sampling rate of the recording.

The NDSI can take values from -1 to 1, where the last one indicates a biological sound, free of anthropophony. Therefore, the more negative the value, the more anthropogenic disturbance the soundscape will present.

It may also be the case that geophonic sounds - such as wind or rain - occur in the same frequency range as anthropophony. These sounds can cover the spectrum at lower frequencies with more energy. In these study cases, the NDSI may reflect the relationship between geophony and biophony rather than between anthropophony and biophony. Even so, the calculation will be considered the same.

3.3. Acoustic Entropy Index (H)

Acoustic entropy (H), or simply entropy, determines the species richness in an acoustic habitat or space. Mathematically it is the product of spectral entropy (H_f or H_s) and temporal entropy (H_t) [9].

$$H = H_t \times H_f \quad (6)$$

Its results are on a scale from 0 to 1, where 0 indicates purer tones, and tends to 1 for random noise. The value increases as the number of frequency bands and amplitude modulations increases.

One of the main issues of entropy is that, if there is a lot of geophony or anthropophony, the index is less reliable and produces false high values. This seems to occur when background noise dominates the recordings, as is often the case in habitats where diversity is lower. On the other hand, the original study, where biological sound is high and background noise is very low, provides expected results [9].

Temporal Entropy (H_t) is calculated from the Hilbert amplitude envelope of the signal. H_t estimates the Shannon uniformity [17] of this envelope. If it is considered a signal $x(t)$ with length n , the oscillation amplitude envelope is obtained by the analytical signal $\zeta(t)$ of $x(t)$. This signal is defined as:

$$\zeta(t) = x(t) + ix_H(t) \quad (7)$$

where i^2 is proportional to -1, and $x_H(t)$ is the Hilbert transform of the signal $x(t)$.

The analytical signal can give access to both the instantaneous amplitude envelope and the instantaneous frequency, using the latter in the H_f . The probability mass function of the amplitude envelope $A(t)$ is obtained as:

$$A(t) = \frac{|\xi(t)|}{\sum_{t=1}^n |\xi(t)|} \quad (8)$$

where:

$$\sum_{t=1}^n A(t) = 1 \quad (9)$$

This means that the amplitude envelope is scaled by its sum, so that the sum of the sample values is equal to 1.

Referring to signal theory, the entropy H of a random variable X with a probability mass function $p_X(x)$ is defined as:

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p_X(x) \times \log_2 p_X(x) dx \quad (10)$$

Considering this and applying Shannon uniformity [17], the temporal entropy is calculated as:

$$H_t = - \frac{\sum_{t=1}^n A(t) \log_2(A(t))}{\log_2(n)} \quad (11)$$

where $\log_2(n)$ is the number of categories. Categories are usually species that are differentiated by their relative abundance in a community. Temporal entropy ranges from 0 to 1.

A noisy signal with a large number of amplitude modulations tends towards 1, while a calm signal will tend towards 0. However, it can also happen that a sustained sound with a nearly flat envelope shows a high temporal entropy.

Spectral entropy (H_f) is similar, but it works in the frequency domain. It is obtained by applying Shannon uniformity [17] to the mean frequency spectrum scaled by its integral, replacing species by frequency intervals. In this way, we start by applying a STFT to the signal to obtain the mean spectrum $s(f)$, which is transformed into a probability mass function, as it is done with H_t . It then becomes known as $S(f)$ and has a size of N samples. Mathematically it is expressed as:

$$H_f = - \frac{\sum_{f=1}^N S(f) \log_2(S(f))}{\log_2(N)} \quad (12)$$

The index is also limited between 0 and 1, following the same reasoning as that taken for temporal entropy.

3.4. Acoustic Richness (AR)

The AR [10] is an index based on the temporal entropy index [9] and the median of the amplitude envelope, resulting in the index M . It reflects the amplitude of an acoustic recording. M is calculated as:

$$M = \text{median}(A(t)) \times 2^{1-\text{depth}} \quad (13)$$

where $A(t)$ is the amplitude envelope and *depth* are the digitalization bits of the recorded signal.

The index can take values between 0 and 1. Louder recordings will give higher values, reflecting louder soundscapes and more presence of geophony (especially in the case of storms), while lower values will be produced by very quiet recordings, with almost no biophony or geophony. The AR takes the signal size of the M index, and relates it to H_t .

$$AR = \frac{\text{rank}(M) \times \text{rank}(H_t)}{n^2} \quad (14)$$

where M is the median amplitude envelope, H_t is the time entropy, and n is the number of files analysed.

The calculation is based on a set of files, as shown in the equation. First the M and H_t indices will be calculated for each file individually and then the result is sorted in ascending order. The position of each recording is used to calculate the AR index, which is highly dependent on the selected set of files.

The results of this index were successfully used in bird species identification and take the same values as the indices on which it depends. Higher values indicate a greater richness of the soundscape.

3.5. Acoustic Diversity Index (ADI)

The ADI [11] uses the Shannon uniformity index [17] applied to the spectral content, as does the spectral entropy H_f [9]. This index calculates the STDFT of the signal and divides it into short frequency bins (e.g., 1 kHz). From each division, the relative amplitude above a certain threshold (usually specified in dB) is selected and the Shannon index is then applied to the chosen intervals. Thus, the index determines how full the selected intervals are, which indicates the degree of occupancy of the different acoustic niches in the recordings. It is expressed as follows:

$$ADI = \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i) \quad (15)$$

where p_i is the fraction of sound in each frequency band i and S is the number of frequency bands.

By default, the bandwidth between 0 and 10 kHz is divided into 10 intervals, where the selected threshold is -50 dB to eliminate background noise [18]. However, these parameters can be modified according to the specifications of the soundscape.

This index increases with the uniformity of the frequency bands. A uniform signal (noisy or completely silent in all frequency bands) will give a high value, while a punctual tone (energy concentrated in a short period of time) will be closer to 0.

Therefore, higher values are usually produced by high levels of geophony or anthropophony covering the noise spectrogram, or otherwise quiet recordings with no variations in the frequency bands. On the other hand, low values are produced by the dominance of a narrow band of frequencies, such as for example the night-time sound of some insects.

4. β INDICES

The β indices focus on estimating the acoustic dissimilarity or disparity between communities of organisms or between two-time intervals in the same community [6]. In other words, these indices help determine the extent to which two or more acoustic communities (or soundscapes) are acoustically different. They can also be used to evaluate changes in the same soundscape or community between two different dates.

Despite their similarity to traditional measures for these types of communities, some of the studies using these types of indices have several problems related to frequency, time, and amplitude. Some of them are the sensitivity of the sensor to the overlapping of the community's song, proximity or remoteness of the sound source, background noise, etc. These can lead to amplitude variations that should not be interpreted as relevant differences to the study.

Although there is great interest in comparing sounds to identify species or individuals, the methods used are adapted to closely related sounds (such as vocalisations produced by a single individual) and are generally very simple indices that need improvement. In most cases they would not be optimal for comparing sounds coming from complete and complex communities and landscapes where it is difficult to define similarities.

The experimental work carried out in the second part covers firstly the analysis of the general soundscape without focusing on any specific sound community in the area. However, recordings of another soundscape with different characteristics are also available. Therefore, although precise results are not assured, the Acoustic Dissimilarity Index (D) is defined below to compare the two environments and to see how their differences are reflected.

4.1. Acoustic Dissimilarity Index

The Acoustic Dissimilarity Index (D) [9], as its name indicates, evaluates the dissimilarity between two different communities or soundscapes from temporal and spectral data. Similarly, to H, it is the product of a multiplication, in this case, between spectral dissimilarity (D_f) and temporal dissimilarity (D_t).

$$D = D_t \times D_f \quad (16)$$

The dissimilarity between two different signals, which must have the same duration and sampling frequency, is

evaluated by calculating the difference between the amplitude envelope (Eq. 8) of each recording divided by 2.

$$D_t = -\frac{\sum_{t=1}^n |A_1(t) - A_2(t)|}{2} \quad (17)$$

In turn, the spectral dissimilarity (D_f) is calculated in the same way by replacing the amplitude envelope by its Short-Time Fourier Transform (STFT), obtaining the signal $S(f)$ (mean spectrum) as it was calculated to find H_f . The equation is then as follows.

$$D_f = -\frac{\sum_{f=1}^N |S_1(f) - S_2(f)|}{2} \quad (18)$$

The values between which D oscillates vary from 0 to 1. To test its reliability, Sueur and colleagues [9] simulated recordings with vocalisations of different species. These were randomly mixed to obtain recordings to be compared that were different in a greater or lesser number of species. In the simulation, those recordings that shared a smaller number of species increased the value of D, while those recordings with more homogeneous species provided a lower value. Therefore, it can be said that the D index could be used to argue for differences between sound communities, with higher values being obtained the greater the dissimilarity.

5. CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF ACTION

In this first part of the work, the main ecoacoustic indices used in underwater environments have been described for informative and theoretical purposes. The experimental part is based on recordings taken in the deep sea. The application of these indices to the underwater environment is initially complex, as seas and the ocean are noise-filled environments. All these indices were created for the analysis of terrestrial habitats, just as it has been observed in this work. Some of them even started by being tested in simulated environments, where the recordings contained the exact results that made the theory for each index accurate and rigorous.

On the other hand, there is a need to create underwater studies to serve as a baseline in different environments, both polluted with anthropogenic sound and filled with biological presence. Each ecosystem is unique and has varied sounds that make it peculiar and different from the rest. The scarcity of reference data related to the study of underwater habitat makes it difficult to compare results, patterns, trends, etc.

Therefore, after the theoretical compilation, the aim is to transfer these indices to water, even though the acoustic and propagation characteristics change from one medium to another. Further experimental studies will be carried out identifying common patterns and differences, making a final discussion of the viability of the studied indices in marine environments, contributing to increase the reference for future works.

ACKNOWLEDGEMENTS

This publication is part of the project PCI22022-135081-2, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union "NextGenerationEU"/PRTR", where MCIN stands for the Ministry of Science and Innovation; AEI for the State Research Agency; 10.13039/501100011033 for the DOI (Digital Object Identifier) of the Agency; and PRTR for the acronym of the Plan for Recovery, Transformation and Resilience.

REFERENCES

- [1] N. Pieretti, and R. Danovaro, "Acoustic indexes for marine biodiversity trends and ecosystem health," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 375, no. 1814, 20190447, 2020.
- [2] G. Rose, "On the Need to Ask How, Exactly, Is Geography "Visual"?," *Antipode*, vol. 35, no. 2, pp. 212-221, 2003.
- [3] B. Krause, *The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places*, Little, Brown, United States, March 2012.
- [4] A. Farina, and S. H. Gage, *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*, Wiley, United Kingdom, July 2017.
- [5] C. Desjonquères, T. Gifford, and S. Linke, "Passive acoustic monitoring as a potential tool to survey animal and ecosystem processes in freshwater environments", *Freshwater Biology*, vol. 65, no. 1, pp. 7-19, 2020.
- [6] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, and S. Pavoine, "Acoustic Indices for Biodiversity Assessment and Landscape Investigation," *Acta Acustica United With Acustica*, vol. 100, no. 4, pp. 772-781, 2014.
- [7] N. Pieretti, A. Farina, and D. Morri, "A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI)," *Ecological Indicators*, vol. 11, no. 3, pp. 868-873, 2011.
- [8] E. P. Kasten, S. H. Gage, J. Fox, and W. Joo, "The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology," *Ecological Informatics*, vol. 12, pp. 50-67, 2012.
- [9] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, and S. Duvail, "Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal," *PLOS ONE*, vol. 3, no. 12, pp. 1-9, 2008.
- [10] M. Depraetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, and J. Sueur, "Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland," *Ecological Indicators*, vol. 13, no. 1, pp. 46-54, 2012.
- [11] L. J. Villanueva-Rivera, B. C. Pijanowski, J. Doucette, and B. Pekin, "A primer of acoustic analysis for landscape ecologists," *Landscape Ecology*, vol. 26, no. 9, pp. 1233-1246, 2011.
- [12] A. Farina, and D. Morri, "Source-sink e eco-field: ipotesi ed evidenze sperimentali. Atti del X congresso nazionale della SIEP-IALE. Ecologia e governance del paesaggio: esperienze e prospettive," *Bari*, pp. 365-372, 2008.
- [13] S. H. Gage, and A. C. Axel, "Visualization of temporal change in soundscape power of a Michigan lake habitat over a 4-year period," *Ecological Informatics*, vol. 21, pp. 100-109, 2014.
- [14] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," in *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, no. 2, pp. 70-73, 1967.
- [15] S. H. Gage, and B. M. Napolitano, "Envirosonics equipment and operations manual," *Computational Ecology and Visualization Laboratory*, Michigan State University, 2004.
- [16] S. H. Gage, B. M. Napolitano, and M. C. Cooper, "Assessment of ecosystem biodiversity by acoustic diversity indices," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, no. 5, pp. 2430-2430, 2001.
- [17] C. E. Shannon, and W. Weaver, *The mathematical theory of communication*, Urbana, Illinois University Press, United States, 1949.
- [18] B. K. Pekin, J. Jung, L. J. Villanueva-Rivera, B. C. Pijanowski, and J. A. Ahumada, "Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest," *Landscape Ecology*, vol. 27, pp. 1513-1522, 2012.
- [19] A. Farina, and P. Li, *Methods in Ecoacoustics: The Acoustic Complexity Indices*, Springer Nature, Berlin, 2021.



A PRELIMINARY STUDY ON THE PARTICLE MOTION OF UNDERWATER SOUND SOURCES

J. Carbajo^{1*}

*P. Poveda*¹

*F. Arias*²

*I. Pérez*²

*V. Espinosa*²

*M. Cianferra*³

*U. Tinivella*⁴

*J. Ramis*¹

¹University of Alicante (Spain)

²Valencia Polytechnic University, Gandía Campus (Spain)

³University of Trieste (Italy)

⁴National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (Italy)

ABSTRACT

Underwater acoustics plays a key role for fish to know the marine environment and to communicate between them. In this context, understanding not only how these fishes produce sound but also how they perceive it is of great importance for their preservation and survival. Some recent studies have shown the higher sensitivity of fishes to particle motion than sound pressure and suggest its consideration, especially in the assessment of noisy scenarios. This work gives an insight into the analysis of particle motion of an underwater sound source and its relation to sound pressure level. For this purpose, the radiated sound pressure field of an electrodynamic speaker is used to calculate the corresponding particle motion. Preliminary results highlight the differences between using one magnitude or another, especially in the near-field, and encourage the development of new devices that allow measuring it to better analyze the noise effects on the marine species.

Keywords — Underwater acoustics, fisheries acoustics, particle motion.

1. INTRODUCTION

Underwater acoustics is of great importance for fishes to know the marine environment and to communicate with other species given the limitations of senses such as vision, touch,

taste, and smell. More than 800 species of fish over 100 families have been documented to produce sounds whose characteristics differ from one species to another depending on their population, gender, size, motivations... As pointed out by Hawkins and Rasmussen [1], these sounds provide valuable information concerning temporal disputes, competition for food, predatory attacks, courtship interactions, spawning aggregations...; being their study also a key point to better understand the successful reproduction of fish species and their survival in the marine environment.

Unfortunately, anthropogenic noise (i.e., noise generated by human beings) has increased notably over the last decades, especially due to the development of the fishing industry, aquaculture, and oil prospecting [2]. As a result, marine species extract information from a soundscape composed not only of biological and geological sound sources but also of anthropogenic noise sources. As this background noise increases, communication among marine species gets more difficult due to masking effects. In addition to noise harmful effects, some other aspects such as predator detection or reproduction are affected, thus comprising their preservation and survival. Several recent studies indicate that this noise may cause physical trauma, startle alarm behavior, alteration in metabolism-related genes, increase in the level of biochemical stress parameters, changes in protein content related to stress, and sub-lethal physiological changes that yield reduction in the growth and reproduction rates [3]. Consequently, to preserve the marine species it is extremely

* *Autor de contacto:* jesus.carbajo@ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

necessary to control and monitor the acoustic energy discharged into the sea.

Most underwater noise studies existing in the literature focus on the analysis of measured sound pressure exposure levels. Nevertheless, Popper and Hawkins [4] highlighted the higher sensitivity of fishes to particle motion rather than sound pressure and suggested its consideration in the assessment of marine environments. In this regard, understanding the significance of particle motion in the hearing physiology of fish is of great importance. There is therefore not only a need for new regulations and standards but also for the development of approaches to estimate and measure this particle motion.

This work shows some preliminary results on the analysis of the particle motion of underwater sound sources. Specifically, acoustic pressure measurements along the axis of an underwater electroacoustic sound source were performed in a water tank with a robotized system and an acquisition platform that used a hydrophone sensor. Particle motion was calculated from experimental pressure data, with results showing a good agreement when compared to theoretical predictions using a point source assumption. Additionally, a discussion on the near-field features of such sources served to illustrate the differences between using the particle motion or the sound pressure level to assess the noise level in the marine environment.

2. PARTICLE MOTION IN UNDERWATER ACOUSTICS

2.1. Definition

Particle motion is related to the kinetic energy of a sound wave, this being more important in the near-field (i.e., close to a sound source) than in the far-field, where it equals the potential energy related to the sound pressure (i.e., compression and expansion of the fluid). Different from sound pressure, particle motion is a vectorial quantity that contains directional info and therefore requires several sensors to be determined. Particle motion ξ along a direction r can be easily obtained upon temporal integration of the Euler's equation as

$$\xi = \int \left(-\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt \right) dt \quad (1)$$

where p is the acoustic pressure, ω the angular frequency, and ρ the fluid density (e.g., the water density).

2.2. Prediction of particle motion

Modeling of particle motion may be of great interest in predicting the potential effects of underwater noise sources on marine species. Although this parameter could be extrapolated from well-known Wenz curves [5], this approach requires assuming free-field conditions, thus not

being applicable in the presence of reflections or scenarios close to a vibrating surface, as is the case of shallow water. Alternatively, the use of predictive models allows taking into account temporal and frequential features of the noise source along with the marine media properties that determine the sound speed profile. Besides, these methods avoid the sound pressure to particle motion conversion as this can be directly calculated.

Hovem [6] proposed a modeling technique for the determination of particle motion using ray theory, each ray being considered a plane wave. However, the use of a point source assumption may be more appropriate to calculate the particle motion if the sound source is small compared to the wavelength of interest, especially in the near field where this parameter is more relevant [7]. In this latter case, the sound pressure generated at a distance r from the point source can be obtained from

$$p(r) = A \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2)$$

where A is the pressure amplitude of the spherical wave and $k = \omega/c$ is the wavenumber, being c the sound speed in water.

2.3. Measurement of particle motion

In practice, particle motion can be measured by using vector sensors which may contain both sound pressure and acceleration sensors. Among these, the so-called pressure gradient sensors determine the particle motion along the axis of interest x from the difference between two pressure sensors (e.g., a pair of hydrophones) as [8]

$$\xi(x) = \frac{1}{\omega^2 \rho} (p(x + \Delta/2) - p(x - \Delta/2)) \quad (3)$$

where Δ is the spacing between hydrophones, which determines the sensitivity and bandwidth of the measurement system.

Nedelec et al. [9] proposed a simple formula to calculate the particle motion of a monopole source from the measured near-field sound pressure p at a distance r as follows

$$\xi(r) = \frac{p}{\omega \rho c} \left(1 + \left(\frac{c}{\omega r} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

3. MATERIAL AND METHODS

3.1. Underwater sound source

Both humans and fish make use of sound waves to emit and receive information in the marine environment. In this context, the design and development of systems capable of reproducing sound events still constitutes a challenge to scientist and engineers. Most systems make use of an

electrodynamic speaker whose basic theory can be retrieved from [10]. In this work, the custom-made electrodynamic speaker whose schematic design assembly drawing is depicted in Fig. 1 was used as a sound source.

3.2. Measurement system

The on-axis pressure response of the electrodynamic speaker was measured and used to calculate the corresponding particle motion. The measurement setup consisted of a water tank of dimensions 9.75 m x 4.88 m x 1.32 m and a robotized system that served to place a miniature hydrophone B&K type 8103 at several distances from the source in the range 0.05-0.5 meters with steps of 0.05 m. Fig. 1 shows a picture of the mounting conditions before immersion in the water tank. The speaker and the hydrophone were connected to an audio power amplifier Bosch PLE-1P120-EU and a Nexus CCLD signal conditioner Type 2693-A, respectively, both being connected to the acquisition platform CLIO FW-02 controlled by a PC with the CLIO software. Once all the devices were connected, a Maximum Length Sequence (MLS) signal was sent to the speaker, and the impulse response at each measurement position was obtained.



Figure 1. Underwater sound source: (Left) Schematic design assembly drawing, and (Right) picture of the mounting conditions used to measure its on-axis pressure response (before immersion in the water tank).

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. On-axis pressure response

Fig. 2 shows the measured on-axis pressure response at 0.1 m of the electrodynamic speaker under study. The peak at 45 Hz corresponds to the resonance frequency of the speaker. Below the resonance frequency, it has a slope of +15 dB per octave of frequency, with a flat response curve being observed up to a cut-off frequency of around 450 Hz.

4.2. Particle motion: predictions vs. experiments

Once the frequency response of the underwater sound source was measured, pressure data was used to calculate the particle motion at the resonance frequency both from the finite difference approximation of equation (3) and from the

expression proposed by Nedelec et al. in equation (4). Fig. 2 shows the calculated particle motion normalized to the maximum amplitude value at each case, results being also compared to the analytical equation (2) for a point source. It should be noted that the finite difference values were normalized to the analytical value at the closest distance (i.e., $x = 0.075$ m). In general, both experimental approaches show a good agreement when compared to the analytical results.

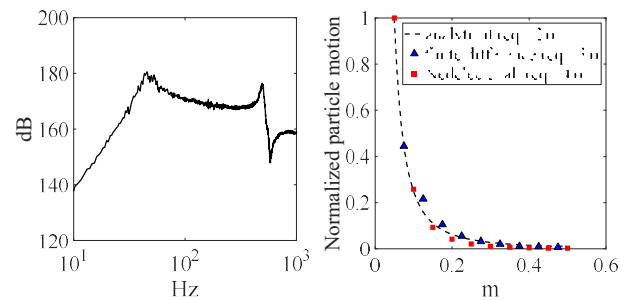


Figure 2. (Top) On-axis pressure response at 0.1 m of the electrodynamic speaker, and (Bottom) Normalized particle motion obtained using different approaches.

4.3. Remarks: particle motion vs. sound pressure level

Finally, let us analyze the acoustic field of the underwater point source described above located in the center of a coordinate plane xy . The radiated sound pressure field at any distance from the source can be obtained from equation (2) by assuming a random amplitude value (e.g., $A = 1$). Equation (3) can then be used to derive the particle motion field by making the calculation both in the x and y directions. Fig. 3 shows the corresponding normalized decibel levels at the frequency of 45 Hz. Significant differences between the particle motion and the sound pressure level patterns can be found (especially for the x -component of the particle motion in the y -axis), the dynamic range of the corresponding decay curves being also different. These discrepancies highlight the drawbacks in the definition of security noise level thresholds from pressure data instead of directly using particle motion data.

5. CONCLUSIONS

The reduction of anthropogenic noise in the marine environment is of crucial importance for the communication and welfare of fish and other marine species. Given that the auditory system of fish is more sensitive to particle motion than to sound pressure, it seems essential to take it into account when quantifying the anthropogenic noise. In this work, it was shown that the on-axis pressure response of an electroacoustic underwater sound source can be used to determine the corresponding particle motion. Results also show that significant differences arise when the sound

pressure level is compared to the particle motion level in the near-field. Even though there exist several systems to measure particle motion (e.g., pressure gradient sensors, inertial sensors...), there are still some issues that must be tackled (e.g., interference, low accuracy...). Therefore, the development of approaches that let both measure the particle motion and analyze its effect on the marine species will presumably be a challenge to be faced in the forthcoming years.

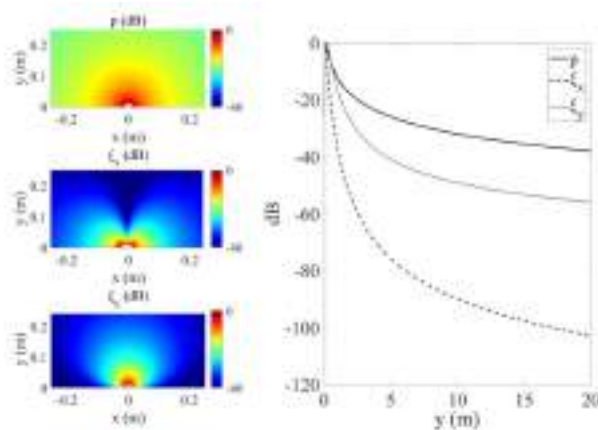


Figure 3. Acoustic pressure and particle motion levels of an underwater point source at 45 Hz: (Left) Spatial patterns, and (Right) y -axis response.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was financed by the European Union NextGenerationEU and FEDER funds under the projects PCI2022-135081-2 and PID2021-127426OB-C22 of the Ministry of Science and Innovation of Spain, respectively. The authors would also like to acknowledge J. Martínez for his invaluable help in the design and development of the electroacoustic sound source.

REFERENCES

[1] A. D. Hawkins, and K. J. Rasmussen, "The calls of gadoid fish," *J Mar Biol Ass*, vol. 58, pp. 891–911, 1978.

[2] E. McCarthy, and J. H. Miller, "Is anthropogenic ambient noise in the ocean increasing?," *J Acoust Soc Am*, vol. 112, 2262, 2002.

[3] E. Di Franco, P. Pierson, L. Di Iorio, A. Calò, J.M. Cottalorda, B. Derijard, A. Di Franco, A. Galvé, M. Guibbolini, J. Lebrun, F. Micheli, F. Priouzeau, C. Risso-de Faverney, F. Rossi, C. Sabourault, G. Spennato, P. Verrando, and P. Guidetti, "Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates: A review," *Mar Pollut Bull*, vol. 159, 111450, 2020.

[4] A. Popper, and A. Hawkins, "The importance of particle motion to fishes and invertebrates," *J Acoust Soc Am*, vol. 143, pp. 470–488, 2018.

[5] Nedelec, S.L., MA Ainslie, MH Andersson, Cheong SH, MB Halvorsen, M Linné, B Martin, A Nöjd, S Robinson, SD Simpson, L Wang, and J Ward, "Best Practice Guide for Underwater Particle Motion Measurement for Biological Applications," Technical report by the University of Exeter for the IOGP Marine Sound and Life Joint Industry Programme, 2021.

[6] J. M. Hovem, "Particle motions in underwater sound fields," in *Proc of the Institute of Acoustics*, vol. 28 (3), 2016.

[7] M. Gray, P. H. Rogers, and D. G. Zeddies, "Acoustic particle motion measurement for bioacousticians: principles and pitfalls," *Proc Mtgs Acoust*, vol. 27, 010022, 2016.

[8] H. W. Jansen, E. Brouns, M. K. Prior, "Vector sensors and acoustic calibration procedures," TNO report R11589, 2017.

[9] S. L. Nedelec, J. Campbell, A. N. Radford, S. D. Simpson, and N. D. Merchant, "Particle motion: the missing link in underwater acoustic ecology," *Methods Ecol Evol*, vol. 7, pp. 836–842, 2016.

[10] L. L. Beranek, T. J. Mellow, "Acoustics. Sound Fields and Transducers," Academic Press, Oxford, 2012.

ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE EL RUIDO EN TANQUES DE REPRODUCCIÓN DEL ATÚN ROJO

Pedro Poveda-Martínez^{1*}; Jesús Carbajo-San-Martín¹; Jaime Ramis-Soriano¹; Víctor Espinosa-Roselló²; Isabel Pérez-Arjona²; Fernando de-la-Gándara-García³; Aurelio Ortega-García³

¹Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Univ. de Alicante
²Intitut d'Investigació per a la Gestió Integrada de Zones Costaneres, Univ. Politècnica de València,
³Centro Oceanográfico de Murcia. Instituto Español de Oceanografía

RESUMEN

El Centro Oceanográfico de Murcia, del Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), a lo largo de las últimas décadas, viene desarrollando numerosos proyectos para conseguir la cría en cautividad del Atún Rojo, llegando a completar con éxito el ciclo biológico en 2016 en instalaciones *offshore*. La Infraestructura Científico-Técnica Singular para el Cultivo del Atún rojo (ICTS-ICAR), situada en el municipio de Cartagena (Murcia), cuenta con cuatro tanques con un volumen total de 7000 m³ destinados al control de la reproducción del Atún Rojo. Las instalaciones poseen todos los elementos indispensables para garantizar el mantenimiento de los peces, incluyendo bombas de calor, sistemas de filtrado y oxigenación del agua, skimmers, etc. Sin embargo, tanto estos equipos como otros elementos del exterior de la instalación generan ruido que se transmite al interior de los tanques y, por tanto, puede ser percibido por los atunes. El ruido subacuático es responsable de numerosos daños en la fauna marina, tanto desde el punto de vista del comportamiento como del biológico. Si bien en Julio de 2023 se ha conseguido por primera vez la reproducción de los atunes ubicados en sus instalaciones, el ruido ambiente puede alterar el comportamiento de los individuos y reducir los rendimientos. En este trabajo se lleva a cabo un estudio vibroacústico preliminar de las instalaciones de ICAR, a fin de valorar su posible influencia sobre el bienestar de los peces.

ABSTRACT

The Murcia Oceanographic Centre of the Spanish Institute of Oceanography (IEO, CSIC), over the last few decades, has been involved in different projects to achieve the captive breeding of Bluefin Tuna, successfully completing the biological cycle in 2016 in offshore facilities. The Singular Scientific-Technical Infrastructure for Bluefin Tuna Farming

(ICTS-ICAR), located in Cartagena (Murcia), has four tanks with a total volume of 7000 m³ for the control of Bluefin Tuna reproduction. The facilities have all the essential elements to guarantee the maintenance of the fish, including heat pumps, water filtering and oxygenation systems, skimmers, etc. However, both this equipment and other elements outside the installation generate noise that is transmitted to the inside of the tanks and can therefore be perceived by the tuna. Underwater noise is responsible for a great deal of damage to marine fauna, both behaviourally and biologically. Although in July 2023 tuna reproduction was achieved for the first time in their facilities, ambient noise can alter the behaviour of individuals and reduce efficiencies. In this work, a preliminary vibroacoustic study of the ICAR facilities is carried out to assess its possible influence on the welfare of the fish.

Palabras Clave— vibroacústica, ruido ambiental, cautividad, bienestar peces.

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

El atún rojo (*Thunnus thynnus*), también conocido como atún de aleta azul, tiene su origen en el océano Atlántico [1] y su presencia se extiende a los mares adyacentes como el Mar Mediterráneo o el Mar Negro [2]. Con un peso máximo cercano a los 725 kg [3-5] y una longitud que puede alcanzar los 3.3 m [6], su carne representa un alimento rico en ácidos grasos omega3, minerales y proteínas, por lo que se ha convertido en una de las especies más codiciadas del planeta. La alta demanda ha supuesto un incremento considerable de su precio en el mercado y, en consecuencia, ha convertido al atún rojo en un elemento de gran importancia económica, con un valor de primera venta cercano a los 183 millones de euros en España en 2022 [7].

* **Autor de contacto:** pedro.poveda@ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

La creciente demanda de las últimas décadas ha supuesto una presión elevada sobre el atún rojo. La sobreexplotación de los mares ha dado lugar a una disminución de la biomasa y, por tanto, a la necesidad de una legislación más estricta de cara a proteger a la especie. La reducción cuotas de pesca (en 2023 la cuota de atún rojo en España es de aprox. 6.77 toneladas), la imposición de un límite de peso en las capturas, la mejora de los sistemas de conteo o la inversión en investigación científica son algunas de las acciones más significativas.

Durante las últimas décadas, el Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), a través del Centro Oceanográfico de Murcia, ha dedicado grandes esfuerzos a la protección de la especie, tratando de conseguir la cría en cautividad del Atún Rojo. De esta forma, tras 10 años de investigación, en 2016, el IEO llega a completar con éxito el ciclo biológico en instalaciones en mar abierto o instalaciones *offshore*, logrando, a partir de individuos adultos gestados y criados en cautividad, la puesta de alrededor de 50.000 huevos fértiles.

Durante los últimos años, la institución se ha centrado en conseguir un nuevo hito, la cría de Atún Rojo en instalaciones en tierra. Para ello, el IEO cuenta con la Infraestructura Científico-Técnica Singular para el Cultivo del Atún rojo (ICTS-ICAR) (figura 1), situada en el municipio de Cartagena (Murcia). El recinto dispone de cuatro tanques de gran tamaño que proporcionan un volumen total de 7000 m³ destinados al control de la reproducción del Atún Rojo. Actualmente, solo los tanques de mayor envergadura se encuentran ocupados. Los atunes existentes corresponden a ejemplares nacidos en cautividad y trasladados al ICTS-ICAR en 2015. Para garantizar la viabilidad de los individuos, las instalaciones cuentan con un sistema de filtrado, oxigenación y recirculación de agua, lo que supone la presencia de bombas de presión y/o tubos de succión/impulsión de agua (skimmers). Asimismo, los tanques cuentan con bombas de calor, lo que permite controlar la temperatura del agua según las necesidades de la población.



Figura 1. Vista general de las instalaciones de ICTS-ICAR.

Gran parte de los equipos destinados al mantenimiento de los atunes, así como otros agentes existentes en el entorno inmediato de las instalaciones (transpaleta, vehículos, obras, ...) son susceptibles de generar ruido en los tanques, ya sea a través de la propagación del sonido por vía aérea o de las vibraciones transmitidas por vía estructural. Este tipo de perturbaciones, inexistentes en un paisaje sonoro natural, pueden afectar al bienestar de los animales tanto desde el punto de vista biológico como del comportamiento. La acústica submarina resulta vital para un pez a la hora de conocer su entorno, comunicarse con otros individuos o detectar posibles amenazas [8]. Estudios recientes evidencian posibles lesiones internas y daños en las células sensoriales ante la exposición de los peces al ruido; alteraciones del metabolismo; cambios en las proteínas relacionados con el estrés; o cambios subletales como la reducción de las tasas de crecimiento y reproducción [9-14].

En julio de 2023, el proyecto llevado a cabo en el ICTS-ICAR da sus primeros resultados satisfactorios y alcanza un hito sin precedentes al conseguir por primera vez a nivel mundial la reproducción del atún rojo en instalaciones en tierra. Sin embargo, a pesar del éxito, el ruido ambiente puede alterar el comportamiento de los individuos y reducir los rendimientos. Por ello, resulta necesario estudiar y caracterizar las diferentes fuentes de ruido presentes en las instalaciones, así como valorar su nivel de influencia en el paisaje sonoro de los tanques. En este trabajo se lleva a cabo un estudio preliminar de las instalaciones de ICAR, a fin de valorar la posible influencia del ruido sobre el bienestar de los atunes.

2. BACKGROUND

Las instalaciones de ICAR cuentan con dos tanques de gran tamaño de 22 y 20 metros de diámetro respectivamente y 10 metros de profundidad (denominados en lo sucesivo tanque 1 y 2); y dos tanques pequeños, de 14 y 8 metros y una profundidad de 6 y 3 metros (tanque 3 y 4).

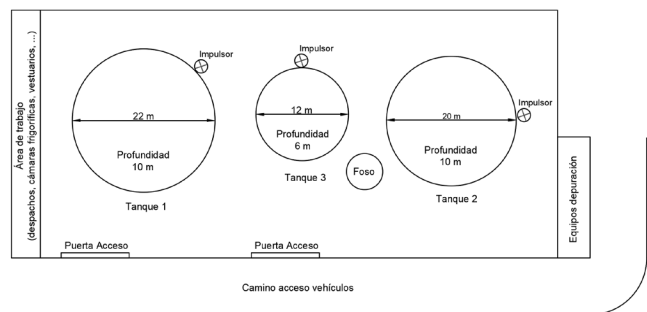


Figura 2. Disposición de los tanques y las fuentes de ruido dentro del recinto.

Cada tanque posee un sistema de filtrado, oxigenación y recirculación de agua completamente independiente instalado

en uno de los laterales de la nave. Asimismo, todos los tanques incluyen diversos tubos en su perímetro para el retorno del agua. Estos impulsores llevan a cabo el vertido a una altura exterior de aproximadamente 0.5 m respecto a la superficie del agua. El sistema de filtrado, siempre que el tanque albergue atunes, funciona de forma continua (24 h/día), pudiendo desconectarse manualmente para labores de mantenimiento. La figura 2 muestra la disposición de los tanques y la ubicación de las principales fuentes de ruido dentro del recinto.

Centrándonos en los aspectos acústicos del problema, merece la pena comenzar recordando las particularidades del campo sonoro, cuya definición puede ajustarse a la distribución espacial y temporal de la presión sonora. Pese a que la complejidad de dicho campo, dependiendo de la situación en la que nos encontremos, puede ser elevada, desde un punto de vista práctico, especialmente en cuanto a su medición se refiere, se aproxima frecuentemente a uno de los tres casos límite que a continuación se describen y cuyas propiedades han sido abordadas con frecuencia en la literatura: campo libre, campo difuso y campo estacionario.

Cuando hablamos de campo libre, nos referimos a aquella situación en la que la propagación de la energía sonora presenta una dirección claramente preferente. Estaríamos hablando, por ejemplo, de la propagación del sonido en aguas profundas. Hemos de recalcar, por tanto, que el atún rojo estaría sometido a este tipo de campo sonoro en condiciones de libertad, pero también se aproximaría en la mayoría de las instalaciones *offshore*. Por el contrario, un campo difuso es aquel en el que todas las direcciones son igualmente probables. Esta situación tiene lugar en grandes espacios cerrados cuando la longitud de onda es considerablemente inferior a las dimensiones del recinto. Podríamos, por tanto, asemejarlo a la situación estudiada en este trabajo. Sin embargo, teniendo en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el agua y las dimensiones de los tanques, cabe esperar, a baja frecuencia, la existencia de un campo estacionario en el que se produzcan oscilaciones en fase o contrafase para todos puntos de una región. Esta situación dará lugar a la aparición de modos propios y, por tanto, a frecuencias de resonancia, maximizándose la presión sonora ante una fuente de excitación determinada. El uso de materiales absorbentes o elementos difusores en los paramentos exteriores del recinto podría ayudar en la reducción de dicho campo.

De acuerdo con las descripciones anteriores y teniendo en cuenta que los tanques estudiados no disponen de un acondicionamiento acústico específico, resulta evidente la presencia de un campo sonoro estacionario en el interior de los mismos. El contenido espectral de las fuentes de ruido puede dar lugar a la excitación de modos propios y, por tanto, generar resonancias indeseadas para los atunes. Una de las

principales fuentes de ruido la encontramos en la recirculación de agua. El sistema de tuberías retorna el fluido al interior del tanque dejándolo caer desde una altura determinada. Tanto la salida de agua del tubo como la caída sobre la superficie, ambas caracterizadas por la presencia de un flujo turbulento, generan una señal de banda ancha con una composición espectral muy amplia, algo que incrementa notablemente el riesgo de excitación de los modos propios del tanque.

Por otro lado, no existe constancia de un aislamiento acústico específico entre tanques, lo que puede llevar a una “contaminación cruzada” por la transmisión de vibraciones.

Atendiendo a lo expuesto anteriormente, resulta indispensable analizar tanto los niveles de ruido generados por cada una de las fuentes de excitación como su composición espectral. Asimismo, debe prestarse especial atención al grado de transmisión estructural entre tanques o a su comportamiento modal.

3. PASOS EN LA CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA

Las medidas para la caracterización preliminar de las fuentes de ruido en las instalaciones de ICAR se llevaron a cabo en dos fases. En la primera de ellas, realizada durante el mes de mayo de 2023, se monitorizó el nivel de presión sonora en el entorno exterior de los tanques. Para ello, se dispusieron dos micrófonos de medida en las proximidades del tanque 1 (figura 3). Asimismo, se tomaron registros de la vibración existente en las paredes del tanque por medio de dos acelerómetros triaxiales colocados según se indica en la figura 4. La adquisición se llevó a cabo a través de un interrogador QUANTUMX MX1601B de la marca HBK, configurado con una frecuencia de muestreo de 9600 Hz. Se registraron señales de 1 minuto de duración con una periodicidad de 15 minutos durante 2 días.



Figura 3. Equipo de medida situado junto al tanque 1 y empleado en la caracterización de ruido y vibraciones.

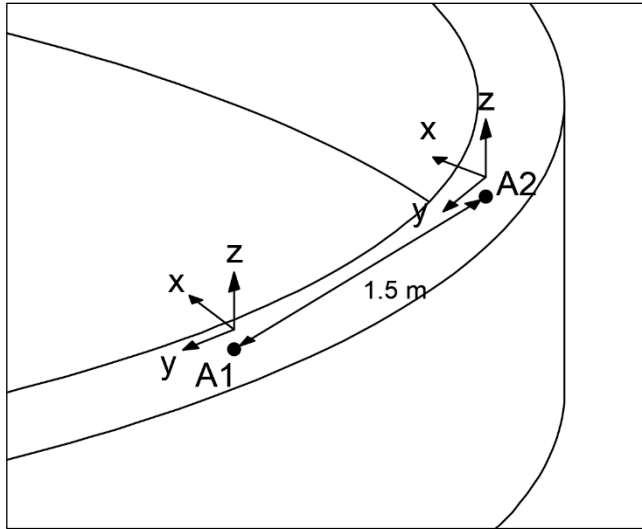


Figura 4. Disposición de los acelerómetros en el muro exterior del tanque 1.

La segunda fase del estudio se realizó en el mes de junio y se dividió en dos ensayos distintos. Por un lado, la caracterización del ruido de fondo y la influencia de los distintos sistemas de depuración y recirculación de agua en el interior de los tanques. Debido a que la época del ensayo coincidía con el periodo de reproducción de los atunes, el estudio se realizó en uno de los tanques de menor tamaño (tanque 3) sin individuos en su interior. Se analizó en este ensayo la influencia cruzada del sistema de depuración de otros tanques, midiendo las siguientes situaciones: 1 – ruido de fondo - BN; 2 – sistema activo en tanque contiguo (tanque 1) – S1; 3 – sistema activo en tanque de medidas (tanque 3) – S2; 4 – sistema activo en tanque contiguo y tanque de medidas – S3. Por último, el segundo análisis consistió en una primera caracterización del campo acústico en el interior del tanque. Para ello, se introdujo una fuente de ruido (altavoz electrodinámico sumergible) a una profundidad de 3 m y en dos posiciones distintas: centro del tanque y muro perimetral. En ambos casos, se emitió un ruido de banda ancha (ruido blanco y MLS) y se registró por medio de un hidrófono la señal propagada a varias distancias: 5 medidas separadas 1.5 m aproximadamente para el primer caso y 14 medidas cada 0.5 m en el segundo. El esquema de medida queda reflejado en las figuras 5 y 6.

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos en el estudio preliminar de las instalaciones de ICAR, haciendo distinción entre las distintas campañas.

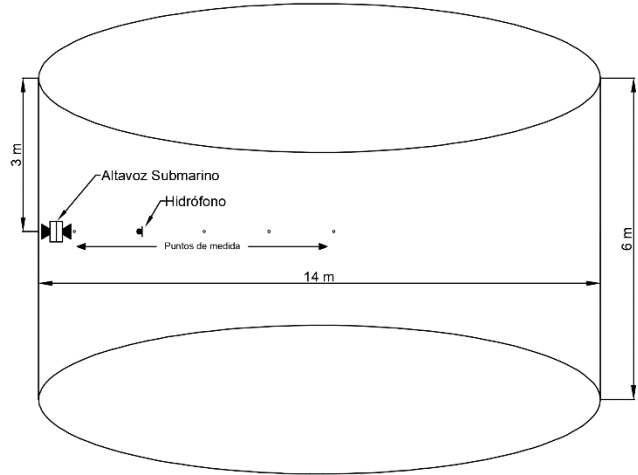


Figura 5. Configuración experimental utilizado en la segunda campaña de medidas. Fuente situada en pared del tanque.

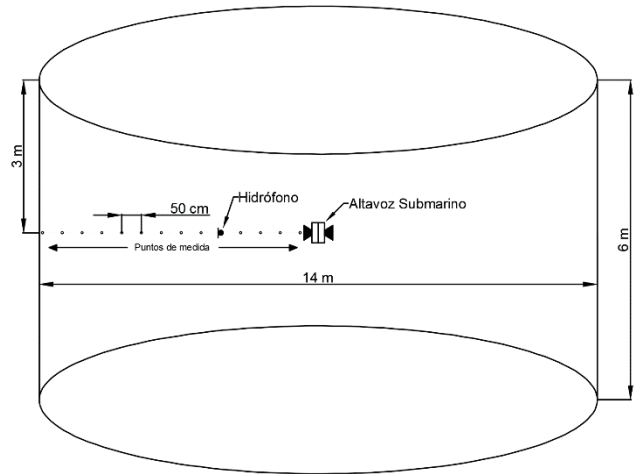


Figura 6. Configuración experimental utilizado en la segunda campaña de medidas. Fuente situada en el centro del tanque.

5.1. Primera campaña

La principal fuente de ruido existente en la instalación corresponde al sistema de recirculación de agua, concretamente, a los impulsores que llevan a cabo el retorno de agua a cada tanque (ver figura 7).

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto un incremento superior a 10 dB en el nivel de presión sonora en la nave al activar la impulsión de agua, pasando de 61 a 73 dB (figura 8). La monitorización llevada a cabo durante 2 días no refleja una influencia notable de otras fuentes, pudiendo haber sido enmascaradas por la fuente principal de ruido.



Figura 7. Sistema de impulsión de agua en el tanque.

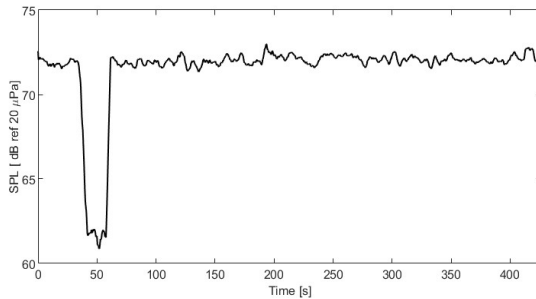


Figura 8. SPLs en aire con y sin impulsión de agua.

Por otro lado, el análisis de la densidad espectral de potencia (PSD) muestra que se trata de un ruido de banda ancha cuyo rango frecuencial está comprendido principalmente entre 250 y 1500 Hz (figura 9). No obstante, destaca la presencia de componentes tonales en 22, 49, 119 y 142 Hz. Estas frecuencias pueden estar relacionadas con el caudal de agua o con la velocidad de giro del motor de la bomba de impulsión.

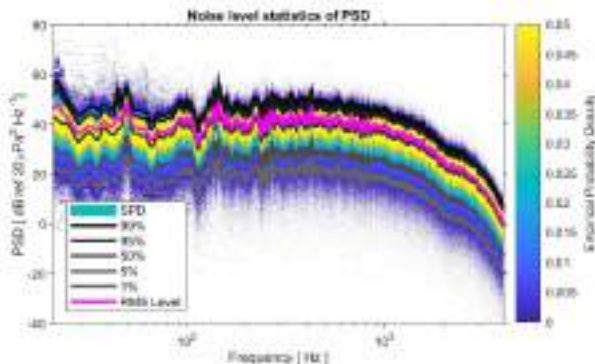


Figura 9. PSD con impulsión activada.

Por lo que respecta a la aceleración en las paredes del tanque, las componentes Y (tangencial) y Z (vertical) parecen mantenerse constantes a lo largo del tiempo (nivel de aceleración de 70.5 dB), sin presentar efecto alguno por la activación o desactivación de los impulsores (figura 10). Por el contrario, la componente X, situada de forma radial, resulta más sensible a las condiciones del tanque. En primer lugar, para el estado de reposo (impulsores desactivados), dicha componente presenta un valor ligeramente superior al resto (71.5 dB). La propia circulación del agua en el interior del tanque (trayectoria circular) ejerce una presión sobre las paredes en dirección radial (aceleración de Coriolis). Al activar el sistema de recirculación y la impulsión de agua en el interior del tanque, tanto la velocidad de rotación del fluido como las perturbaciones en dirección radial aumentan, lo que produce un incremento de alrededor de 2 dB en la aceleración. Esta perturbación, por la dirección que presenta, podría transmitirse vía estructural al resto de tanques de la instalación.

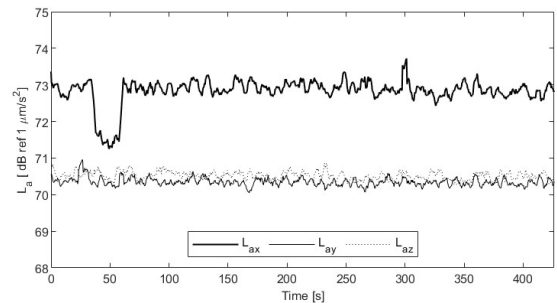


Figura 10. Niveles de aceleración en tanque 1 con y sin impulsión de agua.

5.1. Segunda campaña

De acuerdo con la sección 3, la segunda campaña de medidas incluye dos ensayos distintos. En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para la caracterización del ruido de fondo en el interior del tanque 3. Seguidamente, se incluye un estudio del campo sonoro en el interior del tanque.

A. Caracterización del ruido de fondo. Influencia del sistema de impulsión de agua

Tal y como se observó en los resultados obtenidos para las medidas de la campaña 1, el sistema de impulsión de agua tiene una participación relevante en tanto en el ruido ambiental generado como en las vibraciones producidas en los laterales del tanque. Las medidas llevadas a cabo durante la segunda campaña ponen de manifiesto no solo su influencia en el ruido submarino, sino también en la influencia del sistema sobre el resto de los tanques. Tal y como se muestra en la figura 11, el ruido de fondo existente en el interior del tanque presenta un nivel elevado para

frecuencias por debajo de 100 Hz incluso para la situación de reposo. La activación de los sistemas de impulsión conlleva un incremento de nivel superior a 10 dB en la banda entre 100 y 1.000 Hz; y de al menos 5 dB entre 10 y 20 kHz. Asimismo, se observa como el sistema de impulsión del tanque 1 (S1) provoca un incremento del ruido en el interior del tanque 3. Esto denota una transferencia de energía entre tanques bien por vía aérea o bien por vía estructural. No obstante, cabe destacar que el ruido generado por el sistema de impulsión del tanque objeto de estudio (tanque 3), enmascara por completo el ruido producido por el sistema del tanque 1.

Otro detalle remarcable es la presencia de una componente tonal pura de frecuencia 824 Hz en las tres situaciones analizadas (BN, S1 y S2). Se desconoce la procedencia de dicho ruido, pudiendo estar ligado al funcionamiento de alguna máquina del recinto.

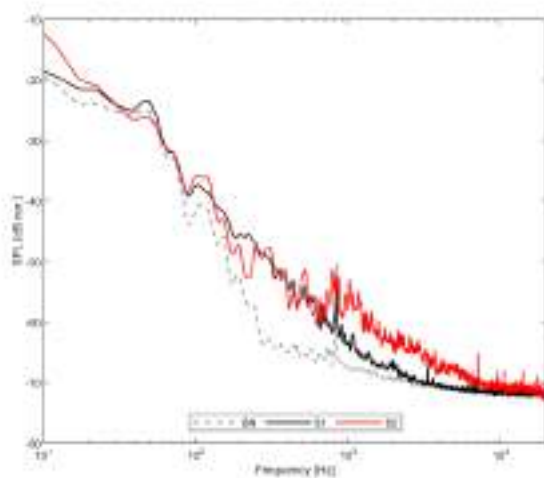


Figura 11. SPL en el interior del tanque para diferentes condiciones.

B. Medidas del campo sonoro en el interior del tanque

La figura 12 ilustra la disposición de fuente e hidrófono en la realización de los ensayos preliminares para la caracterización del campo sonoro en el tanque 3. Tanto en las medidas realizadas con la fuente colocada en un extremo como en las del centro, se observa una caída del nivel de presión sonora conforme nos alejamos de la fuente. Sin embargo, esta caída no se produce de manera constante para todos los puntos, y se aprecian diferencias notables en función de la situación de la fuente.

Mientras que para la fuente situada en la pared se produce una reducción en el SPL de 2.68, 6.75 y 11.45 dB respecto al punto P1 (figura 13), con la excitación central del tanque obtenemos caídas de 13, 19, 22.6 o 25 dB para las primeras 4 posiciones respecto al punto P1 (figura 14).

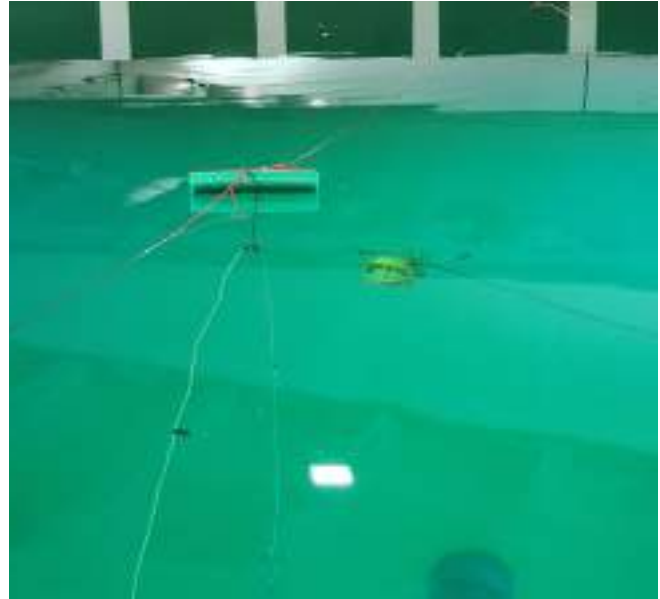


Figura 12. Montaje de fuente e hidrófonos en tanque 3.

Asimismo, ambas figuras muestran la existencia de modos propios en el rango de frecuencias analizado. En función de la posición, ciertas componentes espectrales se ven fuertemente atenuadas o amplificadas. A modo de ejemplo, para la fuente situada en el perímetro del tanque, se amplifica una frecuencia próxima a 400 Hz en el punto de medida 2. Algo similar sucede para el punto 3 con la fuente en el centro para una frecuencia de 230 Hz aproximadamente. En este caso, la caída de nivel respecto a posiciones más próximas a la fuente resulta inferior.

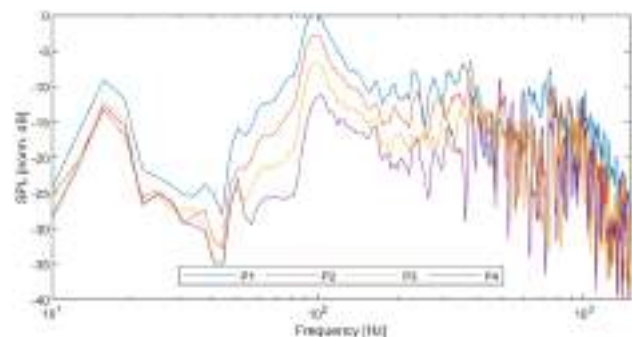


Figura 13. Niveles de presión a lo largo del eje con la fuente situada en la pared del tanque.

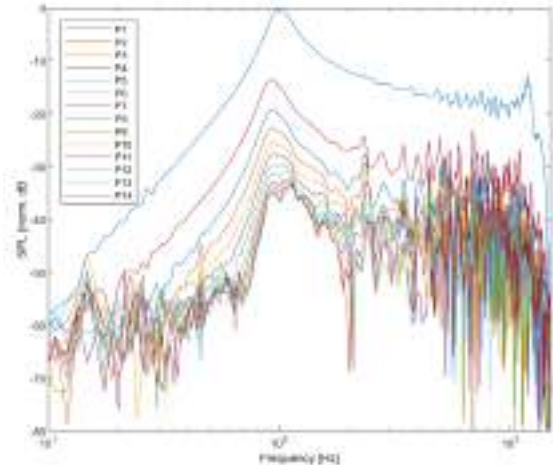


Figura 14. Niveles de presión a lo largo del eje con la fuente situada en el centro del tanque.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo representa un estudio preliminar sobre el ruido en tanques de reproducción de atún rojo. En él, se lleva a cabo una primera identificación de las posibles fuentes de ruido que pueden afectar al bienestar de los peces. Para ello, en primer lugar, se caracteriza el ruido aéreo del recinto, destacando las diferencias existentes en las diferentes condiciones de funcionamiento de las instalaciones. Asimismo, se lleva a cabo una monitorización de la vibración de los tanques, resultando una mayor contribución de las fuentes sobre la componente radial de la aceleración.

Seguidamente, se analiza el ruido subacuático en uno de los tanques. Los resultados muestran una influencia considerable del sistema de impulsión de agua en el ruido global del tanque, especialmente para frecuencias por encima de 100 Hz. Asimismo, se aprecia una contribución notable de los sistemas de recirculación de tanques adyacentes.

Finalmente, se llevó a cabo un estudio preliminar del campo sonoro en el interior de uno de los tanques. Los resultados muestran la existencia de modos propios en el rango frecuencial excitado por el sistema de filtrado y recirculación de las instalaciones. A medida que nos alejamos de la fuente, el campo sonoro se ve cada vez más afectado por dichos modos. Asimismo, el SPL no experimenta una caída de 6 dB al doblar la distancia, lo que indica que estamos en presencia de un campo sonoro muy reverberante.

A la vista de los resultados, queda patente la existencia de ruidos que pueden afectar al bienestar de los atunes y, por tanto, a su productividad. Se hace necesario seguir profundizando en la caracterización tanto del recinto y sus fuentes como en el comportamiento vibroacústico de los tanques a fin de mejorar las condiciones de habitabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de referencia PID2021-127426OB-C22 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ FEDER, UE, siendo MCIN el acrónimo del Ministerio de Ciencia e Innovación, AEI el acrónimo de la Agencia Estatal de Investigación; FEDER, UE el acrónimo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional y 10.13039/501100011033 el DOI (Digital Object Identifier) de la Agencia

REFERENCIAS

- [1] ICCAT. ICCAT manual. Description of species. Chapter 2; 2.1.5. Atlantic bluefin tuna, vol 99. Madrid, ICCAT, pp 93–111. 2010.
- [2] Zaitsev Y. Bluefin tuna in the Black Sea. In: Workshop on farming, management and conservation of bluefin tuna, 5–7 April 2003. Istanbul, Turkey, Turkish Marine Research Foundation Publication No. 13, pp 118–119. 2003.
- [3] Crane J. Notes on the biology and ecology of giant tunas, *Thunnus thynnus* Linnaeus, observed at Portland. *Maine Zool* 21(16):207–212. 1936.
- [4] Lebedeff W. Paradise for big game fishing. Tunny, 700 kgs; Swordfish, 180 kgs; Shark, 1800 kgs. Winter season 1935–36 in Turkey. *Fish Gaz* 113(3102):420–421. 1936.
- [5] Heldt H. Le thon rouge et sa pêche 10 Rapp. *Comm Internat Explor Medit* 11:311–358 Hurley PCF, Iles TD (1980) A brief description of Canadian fisheries for Atlantic bluefin tuna. *Col Vol Sci000 Pap. ICCAT* 11:93–97. 1938.
- [6] Cort JL, Deguara S, Galaz T, Mèlich B, Artetxe I, Arregi I et al. Determination of Lmax for Atlantic Bluefin Tuna, *Thunnus thynnus* (L.), from meta-analysis of published and available biometric data. *Rev Fish Sci* 21(2):181–212. 2013.
- [7] Ministerio de Agricultura, Pesa y Alimentación. Secretaría General de pesca. Contribución de España a las directrices estratégicas para una acuicultura de la UE más sostenible y competitiva 2021 – 2030 (EsAcui 21-30).
- [8] Hawkins, A.D. and K.J. Rasmussen. The calls of gadoid fish. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 58:891-911. 1978.
- [9] Popper, A.N. and Hawkins, A.D. An overview off ish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J. of fish biology.* 94. 692-713. 2019.
- [10] Hawkins, A. D. The potential impacto of offshore wind farms on fishes and invertebrates. *Advances in Oceanography and Marine Biology.* 2(3). 2020.

[11] Mauro M, Pérez-Arjona I, Perez EJB, Ceraulo M, Bou-Cabo M, Benson T, Espinosa V, Beltrame F, Mazzola S, Vazzana M, Buscaino G. The effect of low frequency noise on the behavior of juvenile *Sparus aurata*. *J Acoust Soc Am*. 2020 Jun;147(6):3795. doi:10.1121/10.0001255. PMID: 32611157.

[12] Vazzana M, Mauro M, Ceraulo M, Dioguardi M, Papale E, Mazzola S, Arizza V, Beltrame F, Inguglia L, Buscaino G. Underwater high frequency noise: Biological responses in sea urchin *Arbacia lixula* (Linnaeus, 1758). *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*. 2020 Apr;242:110650. doi: 10.1016/j.cbpa.2020.110650. Epub 2020 Jan 8. PMID: 31923630.

[13] Hawkins, A. D. The impact of underwater sound on aquatic animals – and especially fishes. *J. of agricultura and horticulture research*. 5(2). 98-103. 2022.

[14] Sole´ M, Kaifu K, Mooney TA, Nedelec SL, Olivier F, Radford AN, Vazzana M, Wale MA, Semmens JM, Simpson SD, Buscaino G, Hawkins A, Aguilar de Soto N, Akamatsu T, Chauvaud L, Day RD, Fitzgibbon Q, McCauley RD and Andre´ M (2023) Marine invertebrates and noise. *Front. Mar. Sci*. 10:1129057. doi: 10.3389/fmars.2023.1129057.

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN ALTAVOZ SUBMARINO

José Martínez-Iranzo¹;
Jesús Carbajo-San-Martín^{1,2}
Pedro Poveda-Martínez^{1,2}
Enrique G. Segovia- Eulogio³
Jaime Ramis-Soriano²

¹Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías

²Departamento de Física, Ingeniería de sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante

³Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante

RESUMEN

El diseño de un altavoz para el medio marino implica afrontar diversos retos en comparación con el medio aéreo. La principal dificultad reside en la elevada impedancia acústica del agua, que genera una carga mucho mayor sobre el diafragma y, por tanto, por lo que se exige una mayor resistencia y adaptación a las variaciones de presión. Para ello, se necesita desarrollar un diafragma de gran rigidez y baja masa. Así mismo, se requiere un motor magnético muy potente aumentar el rendimiento y lograr un alto nivel de presión sonora. Además, se debe garantizar un aislamiento efectivo entre la onda frontal y la onda posterior, mediante la incorporación de una cámara totalmente hermética.

ABSTRACT

The design of a loudspeaker for the marine environment involves facing various challenges in comparison with its employment in the air. The main difference lies in the high acoustic impedance of the water, which results in a considerably higher load on the diaphragm and, therefore, in the application of substantial stresses on it, and the extreme variation of static pressure to which underwater projectors are subjected. For this, a diaphragm of exceptional rigidity and very low mass is required. Likewise, a very powerful magnetic motor is required to increase the efficiency and achieve a high sound pressure level. In addition, an effective isolation between the front wave and the back wave must be ensured, by incorporating a completely hermetic chamber.

Palabras Clave— Altavoz electrodinámico, acústica submarina, Respuesta en frecuencia

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

El diseño de un altavoz para el medio marino implica afrontar diversos retos en comparación con el medio aéreo. La principal dificultad reside en la elevada impedancia acústica

del agua, que genera una carga mucho mayor sobre el diafragma y, por tanto, por lo que se le exige una mayor resistencia y adaptación a las variaciones de presión. Para ello, se necesita desarrollar un diafragma de gran rigidez y baja masa. Así mismo, se requiere un motor magnético muy potente aumentar el rendimiento y lograr un alto nivel de presión sonora. Además, se debe garantizar un aislamiento efectivo entre la onda frontal y la onda posterior, mediante la incorporación de una cámara totalmente hermética

Se trabaja inicialmente con un modelo de 8" (20 cm) de diámetro (Figura 1), y un diámetro de bobina de 3" (77mm). Esta está diseñada para poder soportar potencias de 400 W RMS, de manera que se puedan contemplar picos de potencia elevados. El cono se ha fabricado con material composite, concretamente en fibra de carbono. Esto le confiere la rigidez deseada y una masa muy baja. Además, para evitar la entrada del agua por los poros que puedan aparecer entre las fibras, se ha tratado con una silicona autonivelante, en una capa relativamente fina. Tanto la suspensión inferior como la superior se han fabricado con tela impregnada con una resina termo-conformable. También se ha aplicado una capa de silicona en esta última, por las mismas razones antes descritas. Finalmente, el motor magnético está formado por un imán de ferrita de 180 mm de diámetro y piezas polares acordes al tamaño del imán y de la bobina.



Figura 1. Fotografía del altavoz. Izquierda: Vista frontal. Derecha: Vista posterior.

¹ Autor de contacto: jmi21@alu.ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. CONCEPTOS

2.1. Sensibilidad y rendimiento

La sensibilidad, S , de un sistema radiante, es el nivel de presión sonora que se obtiene a 1 metro de distancia cuando se excita con 1 W de potencia eléctrica (normalmente a 1 kHz).

Se define el rendimiento como la relación entre la potencia acústica que radia el altavoz y la potencia eléctrica entregada al mismo. Se denota por la letra η , y, normalmente viene expresado en %. En altavoces de radiación directa nunca se supera el 5% de rendimiento.

La relación entre el rendimiento y la sensibilidad es relativamente fácil de obtener utilizando la relación:

$$\begin{aligned} L_p(r, \theta_0) &= L_W + 10 \log Q(\theta_0) \\ &- 20 \log r - 11 \\ &= 10 \log W_A + DI(\theta_0) \\ &- 20 \log r + 109 \end{aligned} \quad (1)$$

Sustituyendo $W_A = \eta W_E$ y aplicando la ecuación para el caso $r=1$ m y $W_E=1$ w se obtiene la relación entre la sensibilidad y el rendimiento

$$S = 10 \log \eta + DI(\theta_0) + 109 \quad (2)$$

2.2. Potencia radiada

La potencia acústica radiada, W_{RAD} , por una estructura tipo pistón puede obtenerse a partir de la ecuación (3) [1,2,3] en la que u_{ef} es la velocidad eficaz de la superficie de radiación y R_{MR} la parte real de la impedancia mecánica de radiación

$$W_{RAD} = u_{ef}^2 R_{MR} \quad (3)$$

2.3. El altavoz electrodinámico

Se puede demostrar que el rendimiento de un altavoz de tipo electrodinámico se puede obtener a partir de la expresión (4), en la que R_g es la impedancia de salida del generador (amplificador), R_E la resistencia eléctrica de la bobina, Bl el factor de fuerza (campo magnético del imán por la longitud de la bobina y R_{MR} y R_{MD} son, respectivamente, las partes reales de la impedancia de radiación (

$$\eta = \frac{(Bl)^2 R_{MR}}{(R_g + R_E) |Z_{MT}|^2 + (Bl)^2 (2R_{MR} + R_{MD})} \quad (4)$$

Por encima de la frecuencia de resonancia mecánica y antes de la de resonancia electromecánica, la ecuación (3) se puede simplificar obteniendo (4):

$$\eta \approx \frac{(Bl)^2 K_1}{(R_g + R_E)(M_{MD} + 2M_{MR})^2} \quad (5)$$

Donde K_1 es una constante que para el caso del altavoz montado en pantalla infinita vale $K_1 = 0.0054a^2$

3. DESARROLLO

Se han llevado a cabo una serie de estudios y mejoras con el objetivo garantizar unas prestaciones adecuadas para su uso en el medio acuático:

1. Optimización del diafragma. Se ha recurrido al modelado por métodos numéricos, aplicando el Método de los elementos Finitos (MEF), que es un método muy generalizado para la resolución de diversos problemas de física gobernados por ecuaciones diferenciales y cuyas bases pueden consultarse en [4]. Para el presente trabajo se ha empleado el software de simulación en elementos finitos ANSYS® [5,6].
2. Se ha instalado un sensor de vibración (acelerómetro) en la parte de atrás del diafragma para disponer de datos de velocidad de vibración
3. Se ha diseñado y construido un recinto (para el altavoz) con garantías de que no haya inmisiones de líquido cuando sea sumergido (navalización).

3.1. Optimización del diafragma

Tomando como referencia un altavoz descrito en la primera sección se han implementan diferentes modelos en elementos finitos con el objeto de cuantificar los efectos de modificar el perfil del diafragma haciendo hincapié en las variables relacionadas con maximizar su duración y aumentar la potencia radiada con la misma sección, de forma similar a como se enfocó el trabajo [7]. Se trata de un modelo 2D axisimétrico de 6600 elementos cuadráticos de 8 nudos (si no degeneran en triángulos, en cuyo caso serían de 6) y 19600 nudos (con movimientos horizontal, vertical (y presión en los elementos de fluido) como grados de libertad).

Se realiza un análisis de las consecuencias de realizar pequeños cambios en el perfil del diafragma del altavoz con un doble objetivo:

- a) Evaluar las variaciones producidas por estos cambios en el desplazamiento del diafragma que, como es sabido, está relacionado con el volumen desplazado por el mismo y, por tanto, con la potencia radiada y con el rendimiento del sistema.
- b) Identificar y cuantificar el riesgo de rotura de diafragma.

La potencia radiada se evalúa con la ecuación (3). La variación de la resistencia mecánica de radiación con la geometría del diafragma es pequeña en el rango frecuencial de interés para el tamaño considerado. Por tanto, es necesario recurrir a la posibilidad de recurrir a grandes desplazamientos del diafragma. Del estudio numérico que se presenta se obtiene el desplazamiento de cada nodo y a partir del desplazamiento la velocidad.

Con respecto a los criterios para los valores límites de agotamiento y/o rotura, uno de los más utilizados es el llamado *Stress Intensity* [7].

Se estudian diferentes geometrías, comenzando por un diafragma plano (figura 2) para diferentes espesores. Los pasos seguidos son los mismos para cada uno de las geometrías: análisis modal, determinación de factores de participación para la fuerza aplicada (1 N y normal a la superficie uniformemente repartida en los puntos donde la bobina contacta con el diafragma), cálculo de desplazamientos en un segmento radial del diafragma (figura 3 -central) y, por último determinación del parámetro *Stress Intensity*.

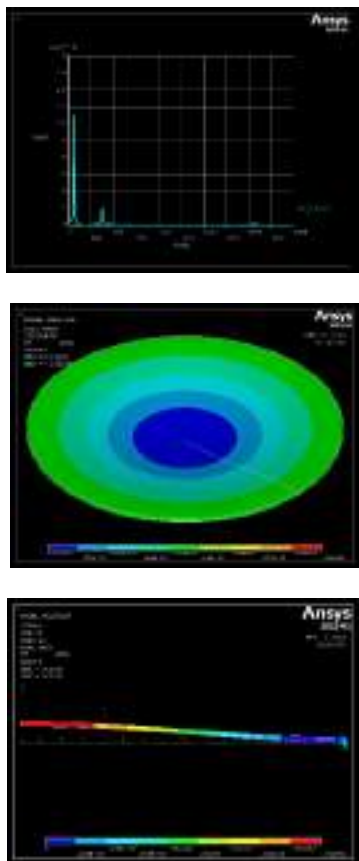


Figura 2. Arriba: factor de participación de cada modo para la fuerza aplicada. Centro: Primer modo se señala el segmento en que se determinan los desplazamientos. Abajo: Movimiento de una membrana plana con fuerza armónica de 1 N a la frecuencia de 20 Hz.

5.2. Sensor para control del nivel de potencia sonora emitido

Si se conoce o se determina numéricamente la parte real de la impedancia de radiación es posible determinar la potencia acústica radiada aplicando la ecuación (3). Se ha optado por instalar un acelerómetro de bajo coste [8]. En la figura 4 se muestra el acelerómetro y en la figura 5 una vez instalado en por la parte de atrás del diafragma.



Figura 4. Acelerómetro miniatura seleccionado



Figura 5. Detalle del acelerómetro una vez pegado en el diafragma por la parte de atrás.

5.3. El recinto

Se ha optado por un recinto cilíndrico con el despiece mostrado en la figura 6 fabricado en POM [9]. En la figura 7 se muestra un detalle del acabado hermético de la parte posterior de la caja por donde pasan los cables de señal y alimentación del acelerómetro.



Figura 6. Despiece del sistema radiante completo. Vista anterior y posterior (en la que se aprecian los pasos de cable y la perforación para el mecanismo de compensación de la presión hidrostática).



Figura 7. Detalle del acabado hermético de la parte posterior de la caja con el cableado necesario (señal proveniente del amplificador y alimentación del acelerómetro)



Figura 8. Aspecto final del sistema radiante.

4. CARACTERIZACIÓN

Se han realizado medidas de impedancia eléctrica y de respuesta en frecuencia en las instalaciones del IGIC en el puerto de Gandía. Los resultados se muestran a continuación.

4.1. Impedancia eléctrica total

En la figura 9 se muestra la impedancia eléctrica en función de la frecuencia en aire y también con el altavoz a una profundidad de unos 40 cm. Se aprecia la bajada de la frecuencia de resonancia que influirá en la respuesta en frecuencia. Como se puede apreciar, la frecuencia de resonancia mecánica baja debido al efecto de la parte imaginaria de la impedancia de radiación.

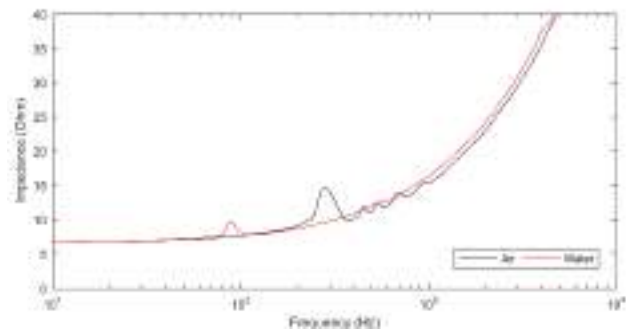


Figura 9. Impedancia eléctrica del sistema radiante medido en aire y en agua.

4.2. Respuesta en frecuencia

En la figura 10 se resumen los resultados. La respuesta En la primera se representa la variación de la respuesta en frecuencia al variar el nivel de excitación (tensión a la entrada del amplificador). Como puede apreciar el sistema radiante presenta un ancho de banda útil entre 50 y 800 Hz. En ese rango la respuesta es prácticamente lineal (incrementos de

tensión de 5 dB se corresponden con incrementos de SPL de 5 dB).

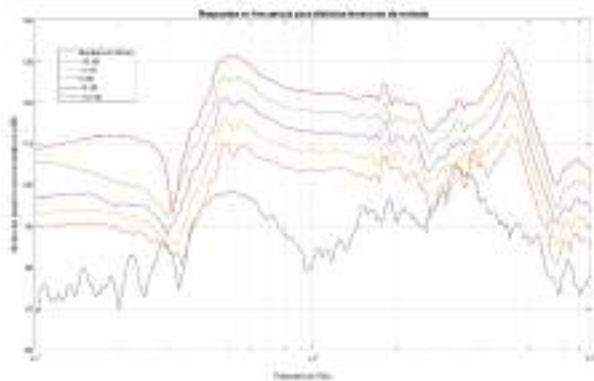


Figura 10. Variación relativa de la respuesta en frecuencia al variar el nivel de excitación (tensión a la entrada del amplificador).

5. CONCLUSIONES

Las prestaciones aportadas por este tipo de transductor para aplicaciones de acústica submarina, cuando sólo se trabaja a pequeñas profundidades, son excelentes en el rango de bajas y medias frecuencias, tanto en presión acústica como en distorsión, a pesar de unas prestaciones al aire modestas. Esta solución es muy atractiva para ser utilizada en instalaciones como es el caso en tanques y piscinas, ya que se puede evitar tener que recurrir a compensaciones de presión que pueden ser problemáticas, pues implica que las suspensiones han de ser muy flexibles para poder alcanzar este mismo rango de frecuencia. En la actualidad se está trabajando en un sistema de compensación de la presión hidrostática que permitiría el trabajo a mayores profundidades.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte de los proyectos PCI2022-135081-2, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR” y del PID2021-127426OB-C22 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ FEDER, UE, siendo MCIN el acrónimo del Ministerio de Ciencia e Innovación, AEI el acrónimo de la Agencia Estatal de Investigación; FEDER, UE el acrónimo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional y 10.13039/501100011033 el DOI (Digital Object Identifier) de la Agencia.

REFERENCIAS

[1] Harry F. Olson, Elements of Acoustical Engineering, D. Van Nostrand Company, Inc, 1940.
 [2] Leo L. Beranek, Acoustics, McGraw Hill Book Company, 1954.

[3] John L. Butler • Charles H. Sherman, Transducers and Arrays for Underwater Sound. 2nd Edition – Springer International Publishing, Switzerland 2007, 2016 ISSN 2364-4923.

[4] O. C. Zienkiewicz, El método de los elementos finitos, Ed. Reverté, (1982)

[5] ANSYS theory reference 8.1, ANSYS Inc, (2003).

[6] Ansys® Academic Research Mechanical, Release 2023 R1.01

[7] Estudio numérico del efecto de la modificación del perfil en altavoces de radiación directa de gran tamaño. Ramis, J.; Carbajo, J.; Segovia; Espí, A.; Martínez, J. Tecniacústica 2013. Valladolid (España)

[8] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL1001-1002.pdf>. (consultado 10 de septiembre de 2023)

[9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyoxymethylene> (consultado 10 de septiembre de 2023)

PRIMEROS PASOS EN EL DISEÑO DE SISTEMA RADIANTE DEL TIPO DML PARA ACÚSTICA SUBMARINA

Pedro Poveda-Martínez^{1*}; Jesús Carbajo-San-Martín¹; José Martíenz-Iranzo¹; Enrique G. Segovia-Eulogio²; Umberta Tinivella³; Marta Cianferra⁴; Jaime Ramis-Soriano¹

¹Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante

²Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante.

³Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS. Italy

4. Dipartimento di Ingegneria e Architettura. University of Trieste

RESUMEN

En la actualidad existe una necesidad de disponer de fuentes sonoras adecuadas para reproducir sonidos de baja frecuencia por debajo del agua. Los técnicos involucrados en el problema han recurrido a sistemas radiantes basados en altavoces de tipo electrodinámico, con los consiguientes accesorios. En este trabajo se presenta el proceso seguido para el desarrollo de un sistema radiante basado en el concepto de DML en el que, como es sabido, un actuador excita una placa que vibra y radia al medio. Las características del sistema radiante dependen tanto del actuador como de las dimensiones y propiedades mecánicas de la placa. Se ha diseñado y construido un recinto estanco que permite cambiar la placa y comparar distintas opciones. Después de llevar a cabo una serie de simulaciones, se han llevado a cabo las primeras pruebas experimentales. La potencia acústica radiada puede ser controlada desde el exterior, previa calibración, mediante la señal captada por un acelerómetro colocado en el sistema vibrante.

ABSTRACT

Currently there is a need for suitable sound sources to reproduce low-frequency sounds underwater. The technicians involved in the problem have resorted to radiant systems based on electrodynamic loudspeakers, with the consequent accessories. This paper presents the process followed for the development of a radiating system based on the DML concept in which, as is known, an actuator excites a plate that vibrates and radiates to the medium. The characteristics of the radiating system depend on both the actuator and the dimensions and mechanical properties of the plate. A sealed enclosure has been designed and built to allow

the plate to be changed and to compare different options. After some simulations, the first experimental tests have been carried out. The radiated acoustic power can be controlled from the outside, after calibration, by means of the signal captured by an accelerometer placed in the vibrating system.

Palabras Clave— DML, underwater sound source, actuator, plate, accelerometer.

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

La acústica submarina es un elemento fundamental para los peces. Dadas las condiciones ambientales en las que se encuentran, sentidos como la visión, el tacto o el olfato están completamente limitados y, por tanto, el sonido les permite conocer su entorno y comunicarse con otras especies. Actualmente se encuentran catalogadas más de 800 especies capaces de producir sonido. Los sonidos les permiten obtener información relevante respecto a disputas del territorio, a ataques de depredadores o incluso a situaciones reproductivas [1 – 3].

El sistema auditivo de los peces se encuentra formado tres elementos principales: el oído interno, la vejiga natatoria y la línea lateral [4, 5, 6]. El primero de ellos es el órgano auditivo principal, y se encuentra localizado en la cavidad craneal. Se trata de un sistema de masa inercial, compuesto por una estructura densa de carbonato cálcico que, al desplazarse, entra en contacto con diferentes células sensoriales (células ciliadas) generando señales eléctricas que son interpretadas como sonido por el pez. El segundo, la vejiga natatoria, proporciona información a partir de los cambios de volumen que experimenta como consecuencia de la incidencia de una onda sonora [7]. Se convierte en una nueva fuente de

* **Autor de contacto:** pedro.poveda@ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

radiación, estimulando el oído interno del pez. Por último, encontramos la línea lateral, compuesta por multitud de células ciliadas que proporcionan una señal eléctrica proporcional al movimiento de agua [8]. El aparato auditivo descrito anteriormente representa un sistema extremadamente complejo y eficaz que proporciona al individuo no solo información del sonido, sino también de la dirección de procedencia de este.

Desafortunadamente, la actividad del ser humano en océanos y mares se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas [10-12]. Esto ha provocado un aumento del ruido subacuático, alterando el paisaje sonoro y, por consiguiente, empeorando el estado de bienestar del ecosistema marino. Un ruido excesivo puede interferir en el comportamiento de los peces enmascarando la comunicación y comprometiendo su preservación y supervivencia. Sin embargo, no es el único elemento que se ve influido por el ruido. Tal y como apuntan diferentes estudios, el ruido puede generar problemas físicos por lesiones internas o daño en los sistemas sensoriales de los animales [6, 13-17]. Su influencia se ha observado en bivalvos, cefalópodos o crustáceos, mostrando comportamientos de alarma ante la proximidad de estímulos sonoros [18, 19]. Del mismo modo, el ruido es responsable de ciertas alteraciones en el metabolismo de los peces y genera un aumento del nivel de los parámetros bioquímicos relacionados con el estrés [20-22]. Bajo determinadas condiciones puede generar cambios fisiológicos subletales como la reducción de la tasa de crecimiento o una disminución de la reproducción. Por este motivo, resulta de vital importancia profundizar en el conocimiento sobre los efectos que genera el ruido en las diferentes especies.

Tal y como apuntan Suedel et al. [23], existe una variación notable en el ancho de banda del sistema auditivo de los vertebrados marinos. No obstante, todos ellos tienen la capacidad de percibir sonidos de baja frecuencia con valores de entre 10 y 1000 Hz. Llevar a cabo un estudio completo de la influencia del ruido en animales marinos supone, por tanto, disponer de una fuente capaz de excitar el medio a dichas frecuencias. Los sistemas existentes actualmente en el mercado, por norma general se basan en la utilización de altavoces electrodinámicos como elemento de perturbación del medio. Las prestaciones de este tipo de sistemas a la hora de radiar en baja frecuencia suponen una limitación a tener en cuenta en los estudios realizados.

En este trabajo se presenta el proceso seguido para el desarrollo de un sistema radiante basado en el concepto de DML (*Distributed Mode Loudspeaker*). Asimismo, se incluyen simulaciones preliminares y medidas experimentales del sistema. Por otro lado, el trabajo se completa con el análisis numérico del campo sonoro en el interior de un tanque de agua con el objetivo de validar la

posible configuración experimental a emplear en el estudio de la influencia del ruido en el bienestar de los peces.

2. ALTAVOCES DML

Los altavoces de modos distribuidos (DML en sus iniciales en inglés) consisten en un actuador que está adherido a una placa (figura 1). El actuador juega el papel de transductor electrodinámico, provocando la excitación necesaria para que la placa vibre y radie sonido. En función de las características de ambos equipos, se obtendrá una respuesta frecuencial determinada. Por un lado, destacan la masa mecánica y la compliancia del actuador, que marcarán la impedancia eléctrica total del dispositivo y, por tanto, su rango frecuencial. Por otro, tenemos las características mecánicas de la placa: densidad, módulos de elasticidad; así como las condiciones de contorno a las que esté sometida. En [24, 25] se presenta una visión práctica de estos sistemas radiantes. Asimismo, Heilemann et al. [26] hacen una revisión exhaustiva de las contribuciones más relevantes en el diseño de los altavoces planos.

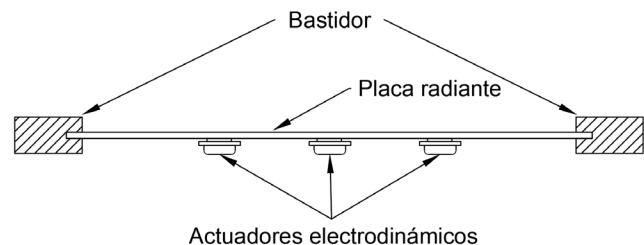


Figura 1. Esquema de un altavoz de modos distribuidos (DML).

3. PASOS EN EL PROCESO DE DISEÑO

A continuación, se detallan los pasos seguidos en el proceso de diseño de la configuración experimental de la que forma parte el altavoz DML, y cuyo objetivo es la evaluación del impacto del ruido en peces.

3.1. Selección de potenciales actuadores. Caracterización.

Tal y como se indicó en la sección 1, de acuerdo con el sistema auditivo de los peces, las frecuencias bajas resultan fundamentales a la hora de relacionarse y comunicarse con otros individuos. Por este motivo, el sistema de excitación seleccionado para la configuración experimental debe ser capaz de radiar a frecuencias bajas, al menos, cercanas a 50 Hz. Por ello, se ha optado por un actuador electrodinámico Multicom Pro (figura 2), de 50 W_{rms}, con una frecuencia de resonancia mecánica de 58 Hz. En la figura 3 se muestra la curva de impedancia eléctrica obtenida de forma experimental mediante el analizador electroacústico CLIO.



Figura 2. Actuador Multicom Pro Bass Transducer.

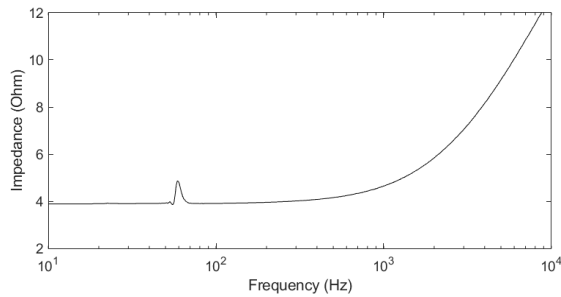


Figura 3. Impedancia eléctrica total del actuador Multicom Pro en función de la frecuencia.

3.2. Selección del material de la placa.

Teniendo en cuenta las condiciones en las que va a ser utilizado el sistema de excitación (medio marino), se optó por un material capaz de soportar grandes esfuerzos (presión hidrostática) además de ser resistente a la degradación por ambientes agresivos (agua salada). Siguiendo estas directrices se consideró el Polioximetileno, conocido comúnmente como POM o Delrin. Se trata de un material fácil de mecanizar y con multitud de aplicaciones. Su resistencia mecánica, su estabilidad dimensional y sus propiedades dieléctricas, lo hacen apropiado para aplicaciones en entornos marinos. En una primera aproximación, se utilizaron las características proporcionadas por el fabricante (ver tabla 1), aunque sus características reales serán obtenidas en etapas posteriores en el laboratorio.

Tabla 1. Parámetros estándar para el Polioximetileno (POM).

Densidad [kg/m ³]	Módulo Elast. [GPa]	Coef. Poisson
1190	3.2	0.35

3.3. Diseño del primer prototipo. Dimensiones y modelado en elementos finitos.

El prototipo desarrollado presenta un diámetro exterior de 300 mm con una superficie radiante de 327 cm² de diámetro

y un volumen interior de 7.56 l. La parte frontal del altavoz se encuentra formada por tres piezas en disposición tipo sándwich. La primera corresponde a la base del frontal, cuya misión es albergar la placa radiante y unirla con el cuerpo del sistema (parte cilíndrica). En segundo lugar, encontramos la placa, cuya vibración provocará la radiación en el medio. El sistema desarrollado permite la sustitución y/o modificación de dicho elemento, pudiendo en todo momento evaluar diferentes materiales o espesores. Finalmente, observamos el anillo envolvente, que se encargará de garantizar la sujeción de la placa alrededor de su perímetro (figura 4).

Con objeto de garantizar la estanqueidad del sistema y evitar la penetración de agua en la zona de instalación del actuador (volumen interno), los contornos de la placa radiante se diseñan de forma que descansen sobre juntas tóricas de goma, que, a pesar de comprimirse cuando se cierra el dispositivo, permitirán cierta movilidad del elemento.



Figura 4. Despiece del primer prototipo sobre el que se ensayarán actuadores y distintos materiales para la placa.

A partir del modelo 3D diseñado, se llevó a cabo una simulación numérica simplificada del dispositivo en elementos finitos. Se trata de verificar el comportamiento del altavoz y establecer, de forma aproximada, su rango de funcionamiento. En el modelo implementado se consideró la interacción fluido-estructura, quedando formado por cuatro dominios básicos: superficies sólidas del altavoz, volumen de aire interno, volumen de aire externo y PML (figura 5). Como consideración inicial para el análisis del prototipo, se estableció una condición de contorno rígida en el perímetro de la placa. Asimismo, el interior de la lámina radiante se excitó con una velocidad normal a la superficie y constante para un rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz. El modelo se malló con un tamaño máximo y mínimo de elemento de 13 cm y 9.6 mm respectivamente, resultando un total de 99344 elementos. Mediante la simulación se determinó la presión en un plano perpendicular a la fuente, así como el nivel de presión sonora a una distancia de 1 m en su eje.

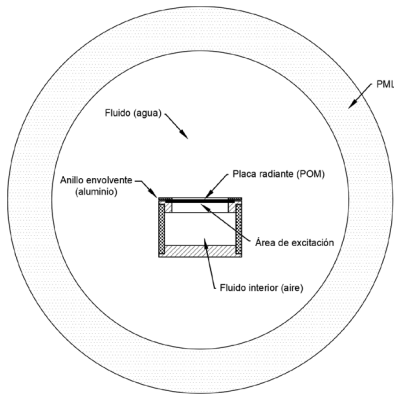


Figura 5. Representación de los distintos dominios incluidos en el modelo en elementos finitos.

Los resultados muestran un comportamiento omnidireccional de la fuente para todo el rango frecuencial analizado (figura 6). Asimismo, el nivel de presión sonora a 1 m de la fuente establece una respuesta espectral del sistema adecuado para frecuencias por encima de 260 Hz (ver figura 7). Cabe mencionar que el espesor empleado para la placa, de 10 mm, posee una rigidez elevada. Esto hecho conlleva una limitación en cuanto a la radiación de frecuencias bajas. Asimismo, para frecuencias por encima de los 825 Hz, el comportamiento modal de la placa adquiere una mayor relevancia.

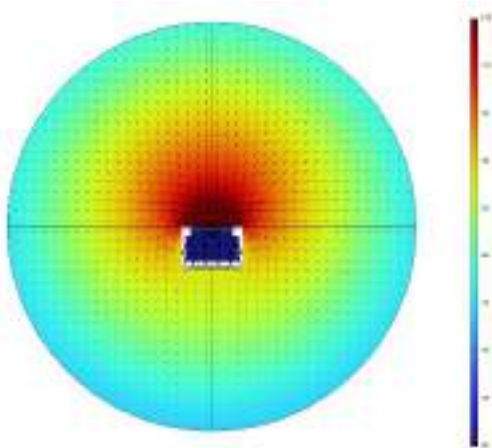


Figura 6. Campo sonoro (SPL) para una frecuencia de 300 Hz.

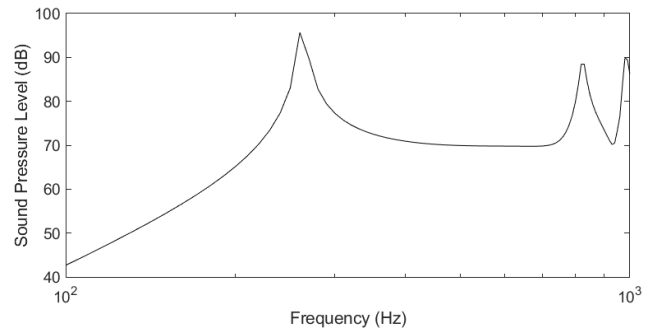


Figura 7. SPL en el eje de la fuente a 1 m de distancia.

3.4. Fabricación del primer prototipo. Instalación del acelerómetro

El altavoz submarino se fabricó siguiendo las directrices del diseño, resultando en el prototipo mostrado en la figura 8. El despiece del sistema puede observarse en la figura 9.

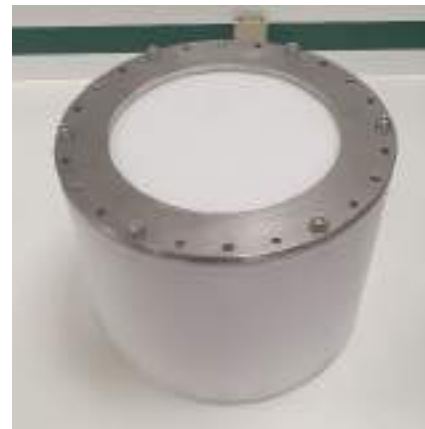


Figura 8. Primer prototipo del altavoz submarino.



Figura 9. Despiece del prototipo desarrollado.

Dentro del altavoz, adherido mediante tornillos a la cara interior de la placa radiante, se situó el actuador. Asimismo, se dispuso en dicha superficie un acelerómetro miniatura modelo ADXL 100xZ con una sensibilidad de 20 mV/g y una frecuencia de resonancia de 42 kHz (figura 10). Mediante este sensor será posible conocer en todo momento la potencia radiada por el altavoz.



Figura 10. Disposición del actuador en la placa radiante. Situación del acelerómetro para la obtención de la potencia de radiación del altavoz.

En primer lugar, se llevaron a cabo medidas de la impedancia eléctrica del sistema, obteniendo una frecuencia de resonancia próxima a los 42 Hz (figura 11), ligeramente por debajo de la del actuador aislado. Posteriormente, para valorar el rango de funcionamiento del sistema se llevan a cabo medidas del nivel de presión sonora a 1 m de la fuente. Las pruebas iniciales se realizan empleando una placa radiante de 10 mm de espesor. Los ensayos tienen lugar en el interior de una cámara semianecoica con un nivel de ruido de fondo inferior a 23 dB. La figura 12 muestra la respuesta en frecuencia obtenida para el altavoz, con un ancho de banda comprendido entre 300 Hz y 1500 Hz. La frecuencia de corte inferior del altavoz se aproxima a la obtenida de forma numérica. A frecuencias por encima de los 1500 Hz nos encontramos fuera del rango de funcionamiento del actuador, por lo que este no es capaz de generar un desplazamiento efectivo de la placa radiante. Esto conlleva una disminución del SPL.

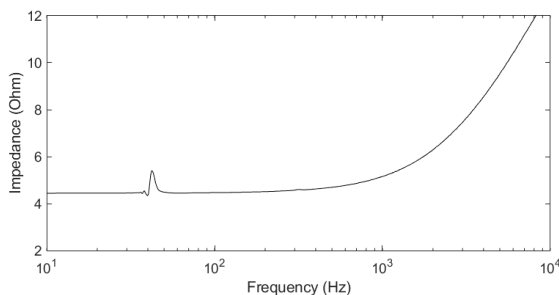


Figura 11. Impedancia eléctrica del sistema completo con placa radiante de 10 mm.

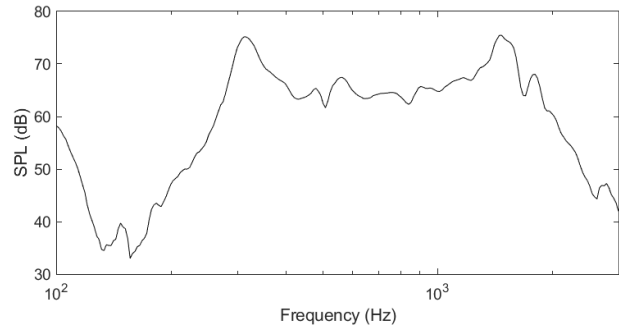


Figura 12. Respuesta en frecuencia medida en el interior de cámara semianecoica a una distancia de 1 m del altavoz en el rango de 100 Hz a 3 kHz en aire

4. CONCLUSIONES

La opción de utilizar un altavoz de tipo DML parece prometedora ya que los primeros resultados indican que, eligiendo adecuadamente el material de la placa vibrante (espesor y parámetros mecánicos) se puede conseguir que la respuesta en frecuencia en agua empiece alrededor de los sesenta Hz. Una ventaja adicional es que el sistema vibrante se puede instalar directamente sobre cualquiera de las paredes del tanque.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto PCI2022-135081-2, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR”, ; MCIN el acrónimo del Ministerio de Ciencia e Innovación; AEI el acrónimo de la Agencia Estatal de Investigación; 10.13039/501100011033 el DOI (Digital Object Identifier) de la Agencia; y PRTR el acrónimo del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

REFERENCIAS

- [1] Hawkins, A.D. and K.J. Rasmussen. The calls of gadoid fish. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 58:891-911. 1978.
- [2] Hawkins, A. D. Underwater sound and fish behaviour,” in *Behaviour of Teleost Fishes*, edited by T. J. Pitcher (Chapman and Hall, London). 1993.
- [3] Popper, A. N., Salmon, M., and Horch, K. W. Acoustic detection and communication by decapod crustaceans,” *J. Comp. Physiol. A* 187, 83–89. 2001.
- [4] Ladich F. Fish bioacoustics. *Curr Opin Neurobiol.* 2014 Oct;28:121-7. doi: 10.1016/j.conb.2014.06.013.

- [5] Popper, A. N. and Hawkins, A. D. The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am.* 143 (1). 2018.
- [6] Popper, A. N. and Hawkins, A. D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J. of fish biology.* 1-22. 2019.
- [7] Schulz-Mirbach T, Metscher B, Ladich F (2012) Relationship between Swim Bladder Morphology and Hearing Abilities—A Case Study on Asian and African Cichlids. *PLoS ONE* 7(8): e42292. doi:10.1371/journal.pone.0042292
- [8] Monroe, J. D.; Rajadinakaran, G.; Smith, M. E. Sensory hair cell death and regeneration in fishes. *Front. Cell. Neurosci.* 9:131. 2015. doi.org/10.3389/fncel.2015.00131
- [10] Clark CW, Ellison WT, Southall BL, Hatch L, Van Parijs SM, Frankel A, Ponirakis D (2009) Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Mar Ecol Prog Ser* 395:201-222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>
- [11] Merchant, N.D.; Fristrup, K.M.; Johnson, M.P.; Tyack, P.L.; Witt, M.J.; Blondel, P.; Parks, S.E. Measuring acoustic habitats. *Methods Ecol. Evol.* 2015, 6, 257–265.
- [12] Williams, R., Clark, C.W., Ponirakis, D., Ashe, E., 2014a. Acoustic quality of critical habitats for three threatened whale populations. *Anim. Conserv.* 17 (2), 174–185.
- [13] Popper, A. N.; Hice-Dunton, L.; Higgs, D.M.; et al. Offshore wind energy development: research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *J. Acous. Soc. Am.* 141. 2022.
- [14] Hawkins, A. D. The potential impact of offshore wind farms on fishes and invertebrates. *Advances in Oceanography and Marine Biology.* 2020.
- [15] Roberts, L. and Laidre M. E. Finding a home in the noise: cross-modal impact of anthropogenic vibration on animal search behaviour. *Biology Open.* 8. 2019.
- [16] Frédéric Olivier, Mathilde Gigot, Delphine Mathias, Youenn Jezequel, Tarik Meziane, et al. Assessing the impacts of anthropogenic sounds on early stages of benthic invertebrates: The “ Larvosonic system”. *Limnology and Oceanography: Methods,* 2023, 21 (2), pp.53-68.
- [17] Hawkins, A. The adverse effects of underwater sound upon fishes and invertebrates. *Int. J. of Oceanography and aquaculture.* 7(1). 2023.
- [18] Jeroen Hubert, Rosalie Moens, Rob Witbaard, Hans Slabbekoorn, Acoustic disturbance in blue mussels: sound-induced valve closure varies with pulse train speed but does not affect phytoplankton clearance rate, *ICES Journal of Marine Science,* Volume 79, Issue 9, November 2022, Pages 2540–2551, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac193>
- [19] Gosling E. 1992. *The Mussel Mytilus: Ecology, Physiology, Genetics and Culture.* Elsevier, Amsterdam.
- [20] Mauro M, Pérez-Arjona I, Perez EJB, Ceraulo M, Bou-Cabo M, Benson T, Espinosa V, Beltrame F, Mazzola S, Vazzana M, Buscaino G. The effect of low frequency noise on the behavior of juvenile *Sparus aurata*. *J Acoust Soc Am.* 2020 Jun;147(6):3795. doi:10.1121/10.0001255. PMID: 32611157.
- [21] Vazzana M, Mauro M, Ceraulo M, Dioguardi M, Papale E, Mazzola S, Arizza V, Beltrame F, Inguglia L, Buscaino G. Underwater high frequency noise: Biological responses in sea urchin *Arbacia lixula* (Linnaeus, 1758). *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol.* 2020 Apr; 242:110650. doi: 10.1016/j.cbpa.2020.110650. Epub 2020 Jan 8. PMID: 31923630.
- [22] Codarin A., Wysocki L. E., Ladich F., Picciulin M. 2009. Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Marine Pollution Bulletin,* 58: 1880–1887.
- [23] Suedel, B.C., McQueen, A.D., Wilkens, J.L., and Fields, M.P. (2018). Evaluating effects of dredging-induced underwater sound to aquatic species: A literature review. *DOER technical notes collection, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.* In Press
- [24] Tech Ingredients. Fantastic DIY Speakers for less than \$30. <https://www.youtube.com/watch?v=zdkyGDqU7xA>
- [25] Tech Ingredients. World’s Best Speakers. <https://www.youtube.com/watch?v=CKIye4RZ-5k&t=678sM>.
- [26] C. Heilemann, D. A. Anderson, S. Roessner, and M. F. Bocko, “The Evolution and Design of Flat-Panel Loudspeakers for Audio Reproduction”. *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 69, no. 1/2, pp. 27–39, (2021 January/February). DOI: <https://doi.org/10.17743/jaes.2020.0057>

COMPARACIÓN DE SEÑALES DE BANDA ANCHA PARA POSICIONAMIENTO ACÚSTICO SUBMARINO

Álvaro Lloret Gaona^{1*}
Víctor Espinosa Roselló¹
Isabel Arjona Pérez¹
Carlos David Llorens Álvarez¹

¹Universitat Politècnica de València

RESUMEN

La presente comunicación tiene como objetivo principal la revisión y comparación de señales para el uso de posicionamiento y comunicación para dispositivos submarinos. Las señales con un uso extendido para este tipo de aplicaciones destacan por estar incorreladas con el ruido de fondo. Principalmente se utilizan señales pseudoaleatorias como la MLS, y barridos frecuenciales. Existen otro tipo de señales no tan comunes, pero que pueden presentar ciertas ventajas frente a las señales más convencionales. En este experimento se ha optado por estudiar una señal TSP (Time-Stretched Pulse). En la comunicación se presenta una simulación para estudiar el comportamiento de la amplitud de correlación de distintas longitudes de señal para distintos valores de SNR y distintas longitudes de señal. Además, se ha realizado un montaje experimental para validar los resultados de la simulación.

ABSTRACT

The main objective of the following article is reviewing and comparing signals for positioning and for underwater device communication. The primary highlight that these signals present when commonly used for these type of applications is being uncorrelated with the background noise. Mainly, pseudo-random signals like MLS and frequency sweeps are used. There are other types of signals which are not as common, but which can provide certain advantages in comparison with the most conventional ones. In this experiment, a TSP (Time-Stretched Pulse) has been examined. In the article, a simulation is used in order to study the behaviour of the amplitude of the correlation between the length of different signals for contrasting different SNR values and different lengths of signals. Furthermore, an

experimental setup has been made with the objective of validating the results of the simulation.

Palabras Clave— Correlación, posicionamiento acústico, TSP, Chirp, MLS.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha ido creciendo la preocupación por el cuidado de los entornos marinos y se han invertido muchos recursos en ello y se han realizado diversos estudios en distintos campos. Es importante para facilitar la toma de datos en campañas de medidas que exista una comunicación eficiente entre los dispositivos y el instrumental científico utilizado.

Un sistema de comunicaciones eficiente puede tener diversos usos como: transmitir datos desde sensores ubicados en el mar sin necesidad de su extracción, envío de ordenes a los distintos dispositivos, posicionamiento mediante balizas acústicas, etc...

La comunicación entre dispositivos en el medio submarino es más compleja que en el aire. Esto se debe en parte a que las señales electromagnéticas utilizadas en aire sufren una mayor atenuación en el agua y por tanto su radio de cobertura y su robustez frente al ruido disminuyen [1,2].

Como alternativa a las ondas electromagnéticas diversos autores proponen el uso de ondas mecánicas para la comunicación entre dispositivos [3,4]. Estas ondas sufren una menor atenuación. Según el alcance en el que se desea trabajar se define un rango frecuencial. El alcance puede ir

* **Autor de contacto:** allogao@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

desde varios kilómetros para bajas frecuencias hasta un centenar de metros para altas frecuencias.

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

El tipo de señales con un uso extendido para aplicaciones comerciales y de investigación son señales moduladas también utilizadas en aire como: FSK, PSK, y OFDM [1]. En este proyecto se presenta la comparación de tres señales menos convencionales para la comunicación submarina de dispositivos.

Una característica importante que deben tener las señales empleadas para comunicación es su robustez frente al ruido de fondo. Las señales deben poder recuperarse o identificarse en ambientes ruidosos. Existen diversos tipos de señales que están incorreladas con el ruido ambiente. Estas señales presentan una alta amplitud de pico en la correlación cruzada entre la señal emitida y recibida.

Las señales empleadas en esta comunicación son tres señales de banda ancha. En primer lugar, se ha utilizado una señal chirp, que se caracteriza por realizar un barrido frecuencial. Estas señales tienen mayor uso en aplicaciones submarinas para posicionamiento y comunicación [5]. Una señal chirp se define según la Ec. 1, y presenta un alto pico en la correlación cruzada. Además, otra característica destacable es que está incorrelada con otra chirp definida en otro rango frecuencial o invertida.

$$x = \sin\left(\phi_0 + 2\pi\left(\frac{f_1 - f_0}{2T}t^2 + f_0t\right)\right) \quad (1)$$

Donde ϕ_0 es la fase inicial, f_0 es la frecuencia final, f_1 es la frecuencia final, y T la duración de la señal.

Las señales MLS (Maximum Length Sequence) son señales pseudo-aleatorias con una amplitud binaria, es decir, su amplitud puede tener dos valores. En 2011 se probaron las señales MLS para obtener la respuesta al impulso y después emitir señales moduladas [6].

Por otro lado, las señales TSP (Time Stretched Pulse) [7] son señales utilizadas en acústica de salas para obtener la respuesta al impulso. La definición de la señal TSP viene dado por la Ec. 2. Es una señal definida en frecuencia y para obtener la señal temporal se realiza la transformada inversa de Fourier.

$$H(k) = \begin{cases} e^{jpk^2}, & 0 \leq k < \frac{N}{2} \\ 1, & k = \frac{N}{2} \\ H^*(N - k), & \frac{N}{2} < k < N \end{cases} \quad (2)$$

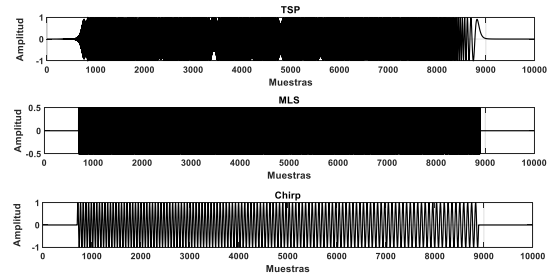


Figura 1. Forma de onda de las señales TSP, MLS, y Chirp.

Existe un método que permite determinar el tiempo de vuelo (ToF, de sus siglas en inglés) mediante la correlación cruzada entre la señal recibida y la señal emitida [8]. En esta correlación aparecerá un máximo pico de correlación desplazado respecto al centro de la correlación. Este retardo en las muestras está directamente relacionado con el tiempo que transcurre entre la emisión y recepción de la señal. Al dividir el retardo por la frecuencia de muestreo se obtiene el tiempo de vuelo de la señal.

$$ToF [s] = \frac{MPCC - \frac{LCC}{2}}{F_s} \quad (3)$$

Donde $MPCC$ es la muestra donde se ubica el pico máximo de la correlación cruzada, LCC es la longitud de la correlación cruzada, y F_s es la frecuencia de muestreo en hercios.

Conociendo el tiempo de vuelo Ec. 3 y calculando la velocidad del agua, Ec. 4 [9] se puede deducir la distancia existente entre el emisor y receptor, Ec. 5.

$$c \left[\frac{m}{s} \right] = 1449 + 4.6 \cdot T - 0.055 \cdot T^2 \dots + 0.0003 \cdot T^3 \dots + (1.39 - 0.012 \cdot T) \cdot (S - 35) + 0.017 \cdot p \quad (4)$$

Donde T es la temperatura del agua en °C, S es la salinidad en porcentaje, y p es la profundidad en metros.

$$d[m] = c \cdot ToF \quad (5)$$

Donde c es la velocidad de propagación en el agua en metros por segundo, y ToF es el tiempo de vuelo en segundos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Sistema de emisión y adquisición.

En este experimento se ha diseñado un sistema capaz de emitir y registrar señales de banda ancha en el agua. El

sistema planteado dispone de una parte de emisión que consta de: un ordenador, una RedPitaya, un amplificador EPA-104, y un transductor SX30-FR. Para la generación de las distintas señales se ha utilizado una RedPitaya conectada por cable ethernet al ordenador y controlada por el software Matlab. Las señales generadas son amplificadas por el amplificador EPA-104 y se transmiten al transductor emisor SX30-FR. La salida del amplificador está monitoreada por el osciloscopio RTM3004, que a su vez registra la señal en el ordenador.

Por otro lado, la parte de recepción se conforma por: un hidrófono B&K 8103, una Nexus, y el osciloscopio RTM3004. El hidrófono percibe las señales y estas son adaptadas por la Nexus. La salida de la Nexus con la señal adaptada queda registrada en el segundo canal del osciloscopio y envía los datos al ordenador.

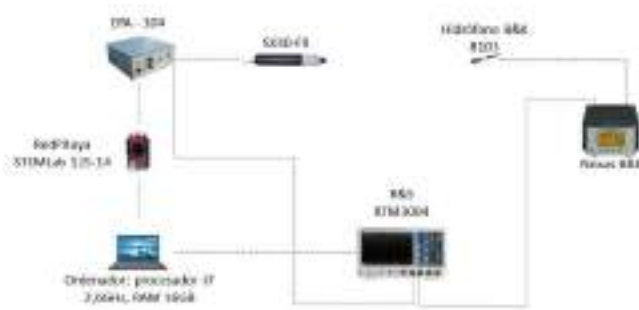


Figura 2. Esquemático del sistema de emisión y recepción diseñado.

3.2 Medidas realizadas.

Se han realizado una serie de medidas con el sistema de adquisición y emisión mencionado previamente. Las medidas se han llevado a cabo en una piscina de dimensiones 8mx4mx1.3m llena de agua dulce. Dicha piscina cuenta con un sistema de ejes que permite controlar las posiciones de emisor y receptor. Para este experimento se ha colocado el emisor en el centro del ancho de una de las paredes y el receptor enfrentado a la distancia mínima que permitían los ejes. Se han establecido cuatro posiciones de medida del receptor respecto al emisor de 2.6, 3.6, 5.1, 7.1 metros. Para cada una de las posiciones se ha repetido la medida 6 veces. Tanto el hidrófono como el transductor emisor estaban sumergidos a la máxima profundidad que permitían los cables, es decir, 10 cm respecto a la superficie. En el momento de hacer el experimento la piscina contaba con un metro de altura para la columna de agua y una temperatura del agua de 27.81 °C.

3.3 Señales utilizadas.

Se han utilizado tres señales distintas: TSP, MLS, y Chirp. Las tres señales utilizadas se han definido con una longitud de 8192 muestras y una duración de 10 ms. La señal chirp utilizada realiza un barrido frecuencial comprendido entre 30 kHz y 40 kHz, esta elección de frecuencias viene dada por las frecuencias de trabajo del transductor consultadas en la hoja de fabricante. La señal TSP y Chirp han sido emitidas con el mismo voltaje, mientras que la señal MLS con la mitad de amplitud.

3.4 Simulación.

Además de las medidas experimentales, se ha realizado una simulación para comparar las tres señales y validar los resultados. La simulación ha consistido en recrear las cuatro posiciones del montaje experimental y comprobar para distintos valores de SNR si se puede determinar la posición correctamente.

Se han utilizado las señales teóricas con amplitudes similares tanto en emisión como en la recepción. A las señales de recepción se les ha añadido un retardo correspondiente con las cuatro distancias de medición.

A las señales de recepción se les ha añadido de ruido blanco con un SNR asignado. Esto se ha realizado mediante la función `awgn()` del software Matlab. No se han tenido en cuenta la interacción de las señales con las múltiples reflexiones.

4. RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales.

Para este experimento se han calculado dos parámetros para poder comparar las tres señales. El primer parámetro calculado se trata de la relación entre la amplitud de correlación obtenida y la amplitud de la señal emitida en voltios. Con este parámetro se pretende observar la eficiencia de las señales en función del voltaje suministrado.

En la siguiente figura se puede observar el primer parámetro mencionado para las tres señales en función de las distintas posiciones. Se extrae de la tabla que la señal MLS ha proporcionado la mayor relación entre amplitud de correlación y energía suministrada al transductor. En segundo lugar, la señal TSP presenta valores similares pero inferiores a la MLS. Por último la señal chirp muestra valores inferiores para las dos primeras posiciones y superiores para las dos últimas.

Es de esperar que la tendencia de los valores obtenidos sea decreciente en función de la distancia. Esto ocurre para las

señales TSP y MLS. Sin embargo, aparece no aparece una tendencia clara para la señal chirp.

Esto puede estar ocasionado por dos razones. La primera es que la amplitud de correlación de la señal chirp esta estrechamente ligada con el ancho de banda de esta y el rango de trabajo del transductor emisor. Generalmente cuanto mayor ancho de banda mayor amplitud. También es posible

Este experimento se ha realizado en un entorno altamente reverberante. Teniendo en cuenta la duración de las señales (10 ms) y la velocidad de propagación calculada para las condiciones del experimento. Se puede determinar que toda reflexión cuyo camino indirecto recorra una distancia menor a 15 metros se va a superponer con la señal del camino directo.

Bajo estas condiciones parece ser que la señal chirp se ve mucho más afectada por las reflexiones que el resto de las señales.

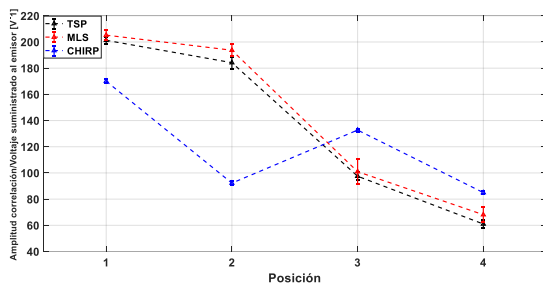


Figura 3. Resultados experimentales de la amplitud de correlación en función del voltaje suministrado para las tres señales empleadas.

El segundo parámetro calculado en esta comunicación es la distancia obtenida a través del método de correlación cruzada. Esta distancia, como se observa en la figura siguiente, se ha comparado con la posición exacta del hidrófono dada por los ejes.

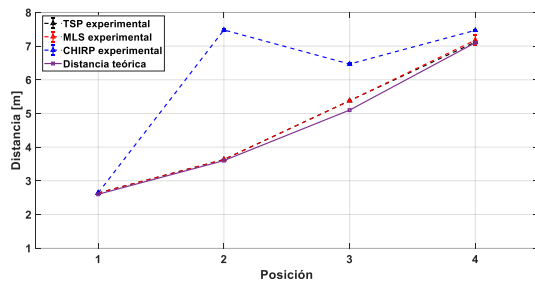


Figura 4. Resultados experimentales del cálculo de la distancia para las tres señales empleadas.

Las señales TSP y MLS presentan una diferencia prácticamente nula entre sí para los resultados de distancia obtenidos. Estas dos señales se aproximan mucho a los valores de distancia reales, donde la máxima diferencia se encuentra en la tercera posición con un valor aproximado de 0.2 metros.

No existe casi desviación en los datos calculados de distancia de ninguna de las tres señales. Esto se debe a la elección de la frecuencia de muestreo. Con una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta aumenta la probabilidad de que el pico de correlación se encuentre en la misma muestra.

Se observa que para la señal chirp las posiciones 2 y 3 no se han podido recuperar, mientras que las posiciones 1 y 4 si se asemejan al valor real de distancia. Esto puede deberse al desplazamiento del pico máximo de correlación en la señal. El desplazamiento del máximo indica que el método de correlación está considerando como máximo de la señal una reflexión tardía en vez del sonido directo.

4.2 Resultados simulación.

Los resultados obtenidos de la simulación se presentan en la Figura 5 y Figura 6. Se han probado varios valores de SNR para las tres señales hasta el nivel más bajo con el cual se puede detectar 6 veces el pico de correlación correcto.

Los valores de las tres señales para la simulación son similares a los valores de las distancias reales. La señal MLS presenta una mayor capacidad para obtener el valor de distancia correctamente en entornos más ruidosos, hasta un valor de SNR de -15 dB. Mientras que la señal TSP y chirp han alcanzado el mismo valor mínimo de SNR de -12 dB.

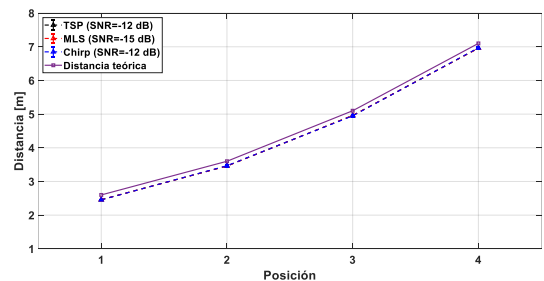


Figura 5. Resultados de la simulación para las distancias calculadas para las tres señales.

Los resultados de las amplitudes difieren notablemente de los valores obtenidos en los resultados experimentales. Esto se debe mayoritariamente a que se ha trabajado con la misma señal con un cambio de amplitud, es decir, no existe la deformación de la señal al ser transmitida por el transductor y recibida por el hidrófono. Además, en la simulación no se tienen en cuenta las múltiples reflexiones de la piscina.

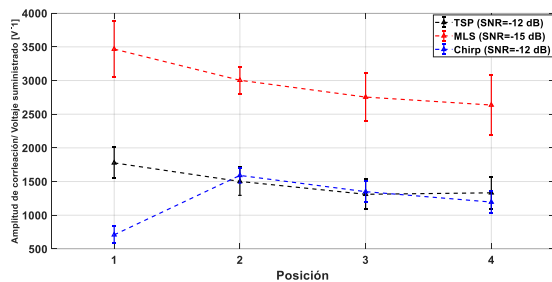


Figura 6. Resultados de la simulación para la amplitud de las tres señales.

Se observa una tendencia decreciente para las tres señales en función de la distancia, menos para la posición 1 de la señal chirp. Esta medida no se debe tener en cuenta ya que se desconoce el porque del resultado. La señal MLS muestra una amplitud claramente superior a las otras dos señales en un entorno más ruidoso.

5. CONCLUSIONES

Como conclusión de los datos experimentales realizados se extrae que las señales de banda ancha TSP y MLS pueden utilizarse para el posicionamiento acústico. Las dos ofrecen amplitudes de correlación parecidas, aunque es la MLS la que ofrece valores de amplitud más altos en función del voltaje suministrado. Por otro lado, no se ha podido discernir de forma correcta la distancia con la señal chirp.

En cuanto a los datos obtenidos en la simulación podemos validar que la señal MLS ofrece la mayor amplitud de correlación en función del voltaje suministrado. Las señales chirp y TSP muestran valores similares de amplitud. También se extrae de los datos que la MLS permite calcular de forma correcta la distancia para niveles de SNR menores que las otras dos señales.

Como conclusión general de esta comunicación cabe destacar que las reflexiones tienen una clara influencia en las medidas experimentales. Especialmente en la señal chirp. Podemos confirmar esto comparando los datos de la simulación donde no se han contemplado las reflexiones y los resultados experimentales.

En un ambiente sin reflexiones la señal MLS es la mejor opción, mientras que en un entorno donde si aparecen reflexiones las señales TSP y MLS aportan resultados similares tanto en amplitud como en el cálculo de la distancia.

Esta comunicación sirve como base para futuros experimentos como: la comparación de las señales en un entorno real y con mayores distancias, estudio de la influencia

de las reflexiones en la amplitud de correlación para distintos valores de tensión, y además la codificación de las tres señales para el uso en aplicaciones de comunicación.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se ha podido llevar a cabo gracias a la financiación del proyecto LIFE15 IP ES 012 con el nombre “INTEGRATED, INNOVATIVE AND PARTICIPATORY MANAGEMENT FOR THE MARINE NATURA 2000 NETWORK IN SPAIN”.

7. REFERENCIAS

- [1] Jiang, S., & Georgakopoulos, S. (2011). Electromagnetic wave propagation into fresh water. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2011.
- [2] Murad, M., Sheikh, A. A., Manzoor, M. A., Felemban, E., & Qaisar, S. (2015). A survey on current
- [3] Zia, M. Y. I., Poncela, J., & Otero, P. (2021). State-of-the-art underwater acoustic communication modems: Classifications, analyses and design challenges. *Wireless personal communications*, 116, 1325-1360
- [4] Sendra, S., Lloret, J., Jimenez, J. M., & Parra, L. (2015). Underwater acoustic modems. *IEEE Sensors Journal*, 16(11), 4063-4071.
- [5] Lei, W., Wang, D., Xie, Y., Chen, B., Hu, X., & Chen, H. (2012, May). Implementation of a high reliable chirp underwater acoustic modem. In *2012 Oceans-Yeosu* (pp. 1-5). IEEE]
- [6] Kočańska, I., & Lasota, H. (2011). Application of OFDM technique to underwater acoustic data transmission. *Hydroacoustics*, 14, 91-98.
- [7] Suzuki, Y., Asano, F., Kim, H. Y., & Sone, T. (1995). An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(2), 1119-1123
- [8] Herter, S., Youssef, S., Becker, M. M., & Fischer, S. C. (2021). Machine Learning Based Preprocessing to Ensure Validity of Cross-Correlated Ultrasound Signals for Time-of-Flight Measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40(1), 1-9
- [9] Hovem, J. M. (2007). Underwater acoustics: Propagation, devices and systems. *Journal of Electroceramics*, 19, 339-347.

CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES ACÚSTICAS Y SÍSMICAS RADIADAS POR CRUCEROS EN EL MAR MEDITERRÁNEO

Esther Moya de Rivas¹
Francisco Javier Rodrigo Saura¹
Antonio Sánchez García¹
Pablo Cervantes Fructuoso¹

¹ Sociedad Anónima de Electrónica Submarina S., M., E. Crta. Algameca, s/n, 30205, Cartagena, Murcia, España

RESUMEN

Las actividades antropogénicas en el medio marino están generando un continuo crecimiento de la contaminación en el entorno marino relacionada con diferentes tipos de energía radiada. El tráfico de cruceros se configura en la actualidad como una de las actividades de mayor crecimiento, especialmente en entornos como el Mar Mediterráneo. Partiendo de estas premisas, esta investigación tiene como principal objetivo avanzar en el conocimiento de las principales características de las radiaciones acústicas y sísmicas emitidas por los cruceros en el Mar Mediterráneo. A partir de un conjunto de medidas realizadas con el sistema de medida MIRS (Multi-Influence Range System) se extraen diferentes características de ambos tipos de radiaciones. En particular, el estudio incluye un análisis de la correlación entre las características acústicas y sísmicas centrado en mostrar su comunalidad a pesar de sus diferentes características de propagación submarina. Señalar que los resultados del estudio muestran un incremento muy significativo en los niveles de energía acústica y sísmica en el entorno submarino con relación al nivel de ruido ambiente como consecuencia del tráfico de cruceros.

ABSTRACT

Anthropogenic activities in the marine environment are generating a continuous growth in the pollution related with different kinds of radiated energy. The cruise ships traffic is configured nowadays as one of the activities of most rapid growth, especially in environments as the Mediterranean Sea. Starting from these premises, this research has as its main objective to advance in the knowledge of the main characteristics of the acoustic and additionally the seismic radiations emitted by cruise ships in the Mediterranean Sea. Different characteristics of both types of radiations are drawn from a set of measurements performed with measurement system Multi-Influence Range System (MIRS). In particular, the study includes an analysis of the correlation between acoustic and seismic characteristics centered on showing common ones, in spite of their different underwater propagation features. To point out that the results of the study

show a very significant increment in the level of acoustic and seismic energies in the underwater environment in relation to the ambient noise level, as a consequence of the cruise ships traffic.

Palabras Clave— Radiación Acústica, Radiación Sísmica, Medidas Multi-Influencia, Contaminación Acústica Submarina.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico mundial está generando un nivel creciente de actividades humanas en una amplia variedad de entornos, incluido el submarino. Estas actividades es la fuente de un conjunto de radiaciones de energía que se propagan en el medio submarino, incluyendo, entre otras: acústica, sísmica, eléctrica y magnética.

En Europa, se publicó la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008 [1], bajo la denominación de Directiva Marco sobre la Estrategia Marina [Marine Strategy Framework Directive-MSFD], con el objetivo de establecer un marco de acción comunitaria en el ámbito de la política del medio marino. Esta directiva introdujo la contaminación acústica submarina, como se detalla en el Descriptor 11. La Decisión 2010/477/UE de la Comisión [2] sobre los criterios y normas metodológicas para el buen estado ambiental (Good Environmental Status GES) de las aguas marinas propuso dos criterios: sonidos impulsivos fuertes, de baja y media frecuencia (C11.1.1) y sonidos continuos de baja frecuencia (C11.2.1). La implementación del Descriptor 11 de la MSFD fue seguida y apoyada por el Subgrupo Técnico de Ruido Submarino de la MSFD (TG Noise), que proporcionó definiciones y recomendaciones detalladas para monitorizar y medir su evolución [3].

La principal fuente de contaminación acústica submarina es el tráfico marítimo [4-8]. El ruido generado por el tráfico marítimo es una combinación de sonidos tonales y ruido de banda ancha repartidos en el rango de frecuencia entre 2 Hz y 100 kHz, y se genera principalmente por la cavitación de la hélice, la maquinaria de a bordo y las turbulencias generadas alrededor del casco [6] y [9].

Las ondas sísmicas son ondas generadas por fuentes de ruido acústico que se propagan por el fondo marino, así pueden ser analizadas simultáneamente con las ondas acústicas como fuente de contaminación marina.

El objetivo de este trabajo es ampliar el conocimiento sobre la caracterización de los campos acústicos y sísmicos radiados por buques tipo cruceros a través del análisis de un conjunto de medidas realizadas con el sistema de medida Multi-Influencia [Multi-Influence Range System-MIRS], desplegado durante tres años en el área del Puerto de Cartagena.

El artículo se divide en un total de cinco apartados, de los que el primero corresponde a la introducción, el segundo a la descripción del Sistema de Medidas Multi-influencia (MIRS), el tercero a la descripción de la campaña de medidas, el cuarto al análisis de los resultados obtenidos y el quinto y último a las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDAS MULTI-INFLUENCIA (MIRS)

El sistema de medidas Multi-Influencia MIRS fabricado por la empresa Sociedad Anónima de Electrónica Submarina, S., M., E. (SAES) proporciona mediciones confiables en un escenario controlado de las influencias submarinas acústicas, eléctricas, magnéticas, de presión y sísmicas. En la Figura 1 se muestra el concepto de operación del sistema MIRS.



Figura 1. Sistema de Medidas Multi-Influencia, MIRS. Concepto Operativo.

Los datos medidos por las unidades de sensores submarinos [Underwater Sensors Unit-USU] se transmiten a la estación de control [Range Control Station – RCS] mediante una conexión por cable híbrido. En la Figura 2 se muestra la unidad USU desplegada en el fondo marino. El hidrófono está montado en la parte superior de la unidad, estando localizado a una distancia inferior a 1 metro tal y como requiere el estándar de la OTAN STANAG 1136 [10].

Los datos de posicionamiento recibidos del buque bajo prueba [Vessel Under Test-(VUT)] se muestran en tiempo real en la unidad RCS, además de las posiciones y los datos de rumbo y actitud de la USU. La capacidad de análisis del sistema MIRS incluye procesamiento de señales estáticas y

alternas tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial.



Figura 2. Sensor submarino Multi-Influencia (USU) durante el despliegue (izquierda) y desplegado en el fondo del mar (derecha).

3. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS

3.1. Descripción del área de medidas

El área de medidas está situada en el puerto de Cartagena (Figura 3), situado en la costa sureste de España. La situación geográfica es longitud 0°59' Oeste y latitud 37°35' Norte. El régimen de viento predominante en la zona es Sursuroeste y Sursureste, y su marea máxima es de alrededor de 0,65 m. Esta zona tiene una intensa actividad antropogénica, con un importante tráfico mercante, de pasajeros, pesquero y recreativo. Además, en la zona se encuentra una de las bases navales más destacadas de la Armada Española. Indicar que no se realizaron medidas de buques militares y, por lo tanto, el ruido radiado por este tipo de buques no está incluido en el estudio.



Figura 3. Zona de medidas: Puerto de Cartagena (Mar Mediterráneo). Muelle de Cartagena y Escombreras.

La selección de la posición final de despliegue del sensor se realizó siguiendo dos criterios. En primer lugar, se realizó una preselección de posiciones en base a los criterios de localización del sensor en las zonas con mayor densidad de tráfico marítimo [11]. En segundo lugar, las ubicaciones preseleccionadas se verificaron sobre la base del análisis de la propagación del sonido realizado en el estudio acústico, con el fin de garantizar que el sensor en estas ubicaciones recibiera la energía acústica radiada por los buques de superficie. El procedimiento estándar utilizado para medir

buques de superficie en aguas poco profundas fue el definido en el estándar STANAG 1136 [10].

3.2. Descripción de la campaña de medidas

El proceso de adquisición se controló mediante el sistema de identificación automática [Automatic Identification System-AIS] [12]. Se integró un sistema AIS con el sistema de adquisición MIRS para detectar la presencia de buques transmisores AIS cerca del sensor y, posteriormente, comenzar a tomar medidas y registrar su información.

Una vez que se completó una medida de un buque, se realizó una nueva medida de manera automática cinco minutos después, con el fin de evaluar los niveles acústicos mientras el buque pasaba por encima del sensor y cuando el buque estaba alejado. El sistema registró no solo la información del sensor, sino también la información de los datos AIS recibidos de todos los buques en el alcance del área de medidas. La integración de un sistema AIS para controlar el tiempo de adquisición proporciona grandes ventajas ya que el sistema de adquisición funciona automáticamente sin intervención humana. La información utilizada para cada buque que navegaba en el área de medidas era; el número de identificación del servicio móvil marítimo (MMSI), el tipo de buque, el seguimiento de sus posiciones y el rumbo y la velocidad durante la medida. Sin embargo, el conjunto de datos AIS transmitido desde los buques no siempre está completo y, a veces, carece del nombre y el tipo del buque. Por esta razón, los datos registrados del sistema AIS deben ser procesados posteriormente y, en ocasiones completados.

Las medidas acústicas se realizaron desde septiembre del año 2013 hasta junio del año 2015. Durante los meses de agosto y septiembre del año 2014, el sistema se detuvo y recuperó para realizar tareas de mantenimiento. Por lo tanto, el sensor funcionó durante un total de 20 meses. En el presente trabajo se ha analizado un conjunto de medidas correspondientes a buques tipo crucero y las medidas de ruido ambiente realizadas minutos después del paso del buque sobre el sensor.

3.3. Descripción del proceso de análisis de señal

El análisis se particulariza para las influencias acústicas y sísmicas, pero la influencia eléctrica, magnética y de presión también son registradas de manera simultánea, lo que permitirá futuros análisis. En la Figura 4 se muestra una mediada acústica y sísmica típicas realizadas de un buque tipo crucero.

Con el objetivo de caracterizar las señales acústicas y sísmicas de buques tipo crucero se implementan tres procesamientos: procesamiento de banda ancha en tercios de octava [One Third Octave-OTO], procesamiento en banda estrecha [NarrowBand-NB] y procesamiento de coherencia de modulación cíclica integrada [Integrated Cyclic Modulation Coherence-ICMC].

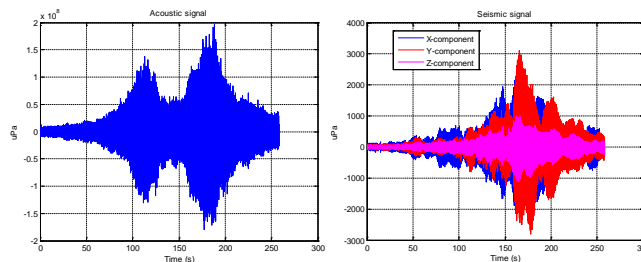


Figura 4. Señal acústica típica (izquierda) y sísmica (derecha) medidas de un buque tipo crucero.

Las magnitudes y unidades acústicas están definidas de acuerdo con las referencias [13-14] y la norma ISO-18405 [15].

El procesamiento de banda ancha se realiza para los tercios de octava definidos de acuerdo con la norma internacional IEC-61260 [16]. Además, se han realizado estudios particularizados para los dos tercios de octava definidos por la Comisión Europea [2], es decir, tercios de octava centrados en 63 y 125 Hz.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

El conjunto de datos de medidas acústicas y sísmicas utilizadas para el presente trabajo está compuesto por sesenta (60) registros correspondientes a diferentes cruceros.

4.1. Análisis de resultados obtenidos en banda ancha

En primer lugar, se analiza las salidas del proceso de banda ancha obtenida en términos de tercios de octava. La Figura 5 muestra para cada medida acústica el tercio de octava de energía máxima.

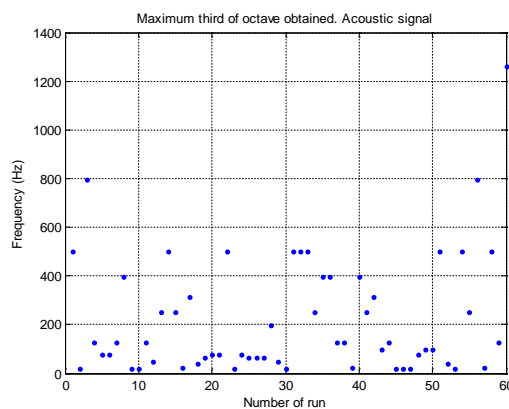


Figura 5. Análisis de Tercios de Octava. Valor de la frecuencia central del tercio de octava de energía máxima para cada medida acústica.

Como se puede observar, para el 62 % de las medidas el tercio de octava de mayor energía se encuentra en la banda < 200 Hz, es decir, banda baja frecuencial. Para el 19 % y 15 %

de las medidas, la frecuencia central del tercio de octava de mayor energía se encuentra en la banda [200 Hz – 400 Hz] y [400 – 600 Hz] respectivamente. Estos resultados muestran que el ruido radiado por cruceros en banda ancha es predominantemente distribuido en la banda hasta 500 Hz.

En la Figura 6 se muestra el valor medio de los valores máximos para cada tercio de octava calculado para todas las medidas acústicas y sísmicas correspondientes tanto a buques tipo crucero como ruido ambiente.

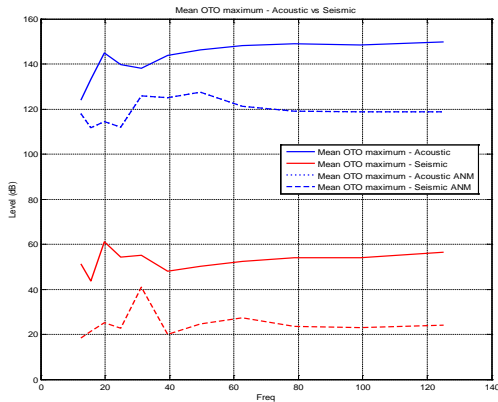


Figura 6. Análisis de Tercios de Octava. Valor medio de los máximos de cada tercio de octava para todas las medidas acústicas y sísmicas correspondientes tanto a buques tipo crucero como ruido ambiente.

La diferencia de nivel de los tercios de las señales sísmicas y acústicas está en torno a 100 dB. Hay una diferencia de 30 dB entre los niveles de los tercios de octava correspondientes a las medidas de buques tipo crucero y medidas de ruido ambiente.

A continuación, se particulariza el análisis para los dos tercios de octava incluidos en la Decisión 2010/477/UE de la Comisión [2]. En la Figura 7 se muestra los niveles máximos para los tercios de octava centrados en 62.5 Hz y 125 Hz para cada medida acústica y sísmica.

Como se puede observar, los indicadores muestran que ambos tercios de octava tienen valores similares para cada influencia, existiendo unas diferencias entre ellos de hasta 10 dB para cada medida. El nivel medio de los tercios centrados en 62,5 y 125 Hz de todas las medidas es similar para las señales acústicas y sísmicas, existiendo una diferencia de 2 dB y 4 dB respectivamente entre la media de cada nivel de cada de tercio.

En el 55% de las medidas, el nivel del tercio de 125 Hz de las señales acústicas es superior al nivel del tercio de 62,5 Hz. En el análisis de las señales sísmicas, el porcentaje de medidas con nivel del tercio centrado en 125 Hz superior al nivel del tercio centrado en 62,5 z es del 68,33 %.

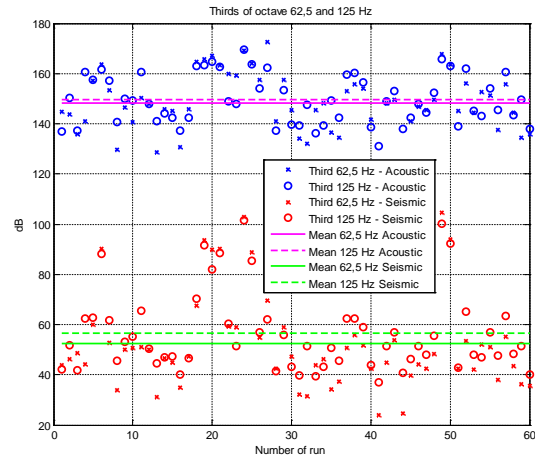


Figura 7. Análisis de Tercios de Octava. Valor máximo de los tercios de octava centrados en 62,5 y 125 Hz.

4.2. Análisis de resultados obtenidos en banda estrecha

El procesamiento de banda estrecha proporciona información sobre los tonos incluidos en la influencia, así como el ancho de banda de interés.

La Figura 8 muestra la frecuencia central del tono de banda estrecha de mayor amplitud. Como se puede observar, existe una correlación entre los tonos máximos detectados en ambas influencias.

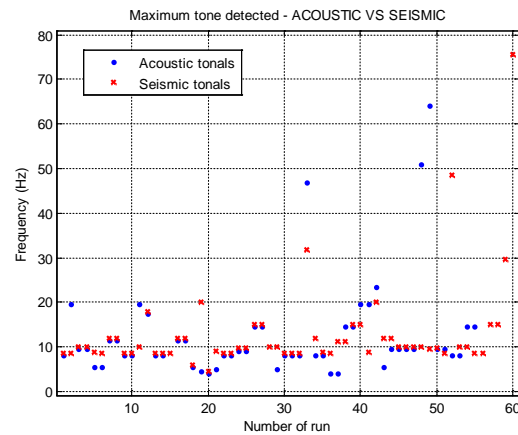


Figura 8. Salida Procesamiento de Banda Estrecha. Frecuencia del tono de Banda Estrecha de mayor amplitud.

En la Figura 9 se muestra la distribución de los tonos de banda estrecha detectados. En las señales acústicas, la mayoría de los tonos se detectan en bajas frecuencias, por debajo de 200 Hz.

En la Figura 10 se muestra la distribución acumulativa de los tonos de banda estrecha detectados en las medidas acústicas. Como se puede observar, el ancho de banda medio de interés de la influencia acústica es aproximadamente de 50

Hz a 745 Hz. Los tonos de frecuencia por encima de 1500 Hz son prácticamente inexistentes.

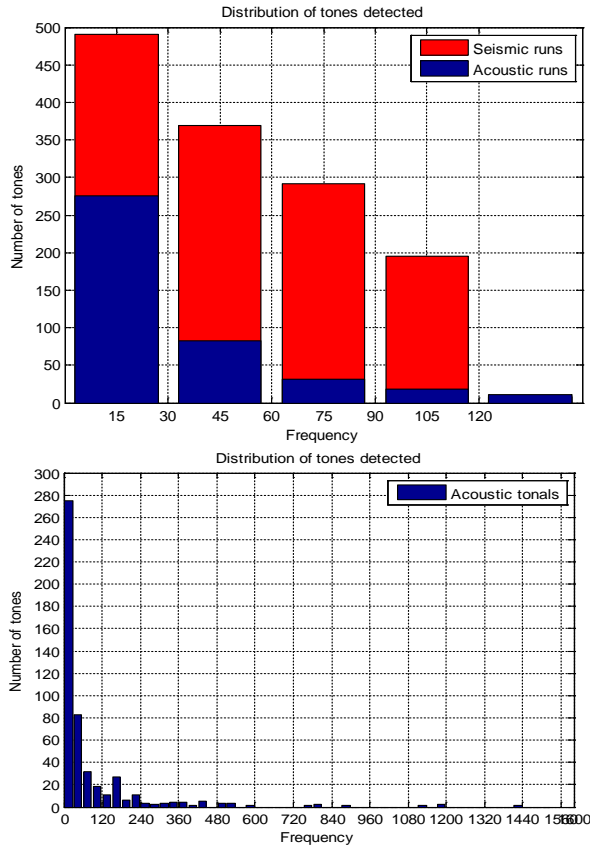


Figura 9. Salida Procesamiento de Banda Estrecha. Número de tonos detectados en baja frecuencia para señales sísmicas y acústicas (arriba). Distribución frecuencial del número de tonos de Banda Estrecha detectados (abajo).

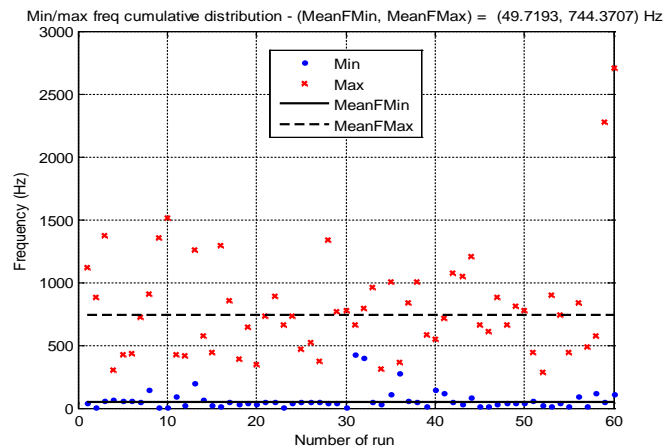


Figura 10. Salida Procesamiento de Banda Estrecha. Frecuencia mínima y máxima de los tonos detectados en Banda estrecha y valores medios.

4.3. Análisis de resultados obtenidos del proceso ICMC

El procesamiento de coherencia de modulación cíclica integrada (ICMC) detecta tonales modulados por el ruido, generado fundamentalmente por la rotación de la hélice. Este proceso se realiza para la influencia acústica.

En la Figura 11 se muestran los tonos ICMC con nivel máximo detectado.

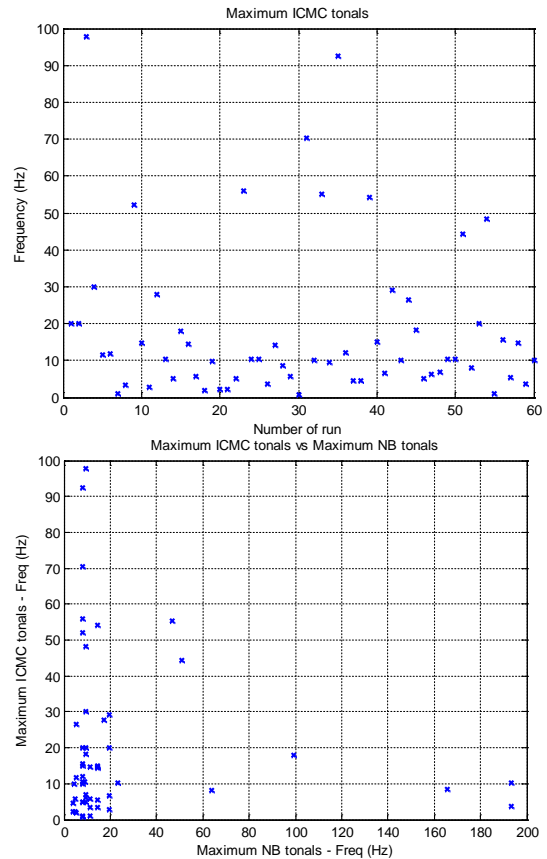


Figura 11. Salida Procesamiento ICMC. Máximos de ICMC (arriba) y Tonales ICMC máximos detectados (abajo).

En la mayoría de las medidas, tanto los tonos ICMC máximos como los tonos NB máximos se detectan por debajo de 20 Hz.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio presenta el análisis de las características de las influencias acústicas y sísmicas radiadas por los buques tipo crucero. El análisis se basa en una campaña de medición realizada durante cuatro meses en el mar Mediterráneo en el Puerto de Cartagena en el sureste de España. Las medidas se realizaron con el sistema MIRS fabricado por SAES.

Se han implementado tres análisis; análisis de banda ancha mediante el procesamiento de los tercios de octava,

análisis de banda estrecha y análisis de modulación del ruido o ICMC, para estudiar las influencias acústicas y sísmicas.

El estudio concluye a partir de los resultados obtenidos de los procesamientos de banda ancha y banda estrecha que existe una correlación entre las señales acústicas y sísmicas verificando que de manera global, ambas señales son generadas por las mismas fuentes.

Los niveles obtenidos del procesamiento en tercios de octava de la influencia sísmica son aproximadamente 100 dB más bajos que el nivel de los tercios de octava obtenidos de las señales acústicas. Los resultados del procesamiento de los tercios de octava también muestran un incremento de 30 dB en el nivel de energía acústica y sísmica en relación con el nivel de ruido ambiental, como consecuencia del tráfico de cruceros.

El procesamiento de banda estrecha muestra un ancho de banda medio de interés de 50 a 745 Hz, sin que se detecten frecuencias principales más allá de 1500 Hz, estando la mayoría de las frecuencias de interés por debajo de 200 Hz. Además, se puede concluir que la mayoría de los tonos detectados en el procesamiento ICMC y banda estrecha tiene el nivel máximo en frecuencias inferiores a 20 Hz.

Trabajos futuros estarán orientados al estudio de la correlación de las influencias acústicas y sísmicas otras influencias de origen no acústico como las electromagnéticas registradas por el sistema MIRS, así como el impacto de la energía electromagnética en el medio marino.

REFERENCIAS

- [1]. European Parliament and Council. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Marine Environmental Policy (Marine Strategy Framework Directive); European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. European Union, (L. 164, 19-40, 2008.
- [2]. European Commission. Decision 2010/477/EU of the European Commission of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters. European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. Eur. Union, (L. 232, 14-24, 2010.
- [3]. Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; André, M.; Brensing, K.; Dalen, J.; Dekeling, R.P.A.; Robinson, S.; Tasker, M.L.; Thomsen, F.; Werner, S. European Marine Strategy Framework Directive-Good Environmental Status (MSFD GES); Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy; Miliu Ltd., Brussels, Belgium, 2012.
- [4]. Ross, D. On ocean underwater ambient noise. *Inst. Acoust. Bull.* 1993, 18, 5–8.
- [5]. Ross, D. Ship sources of ambient noise. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2005, 30, 257–261. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879>.
- [6]. Hildebrand, J.A. Sources of Anthropogenic Sound in the Marine Environment. International Policy Workshop on Sound and Marine Mammals, London, UK, 28–30 September. 2004. Available online: <https://www.mmc.gov/wp-content/uploads/hildebrand.pdf>.
- [7]. McDonald, M.A.; Hildebrand, J.A.; Wiggins, S.M.; Ross, D. A 50 years comparison of ambient noise in Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *J. Acoust. Soc. Am.* 2008, 124, 1985–1992. <https://doi.org/10.1121/1.2967889>.
- [8]. Merchant, N.D.; Witt, M.J.; Blondel, P.; Godley, B.J.; Smith, G.H. Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and automatic identification system (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin.* 2012, 64, 1320–1329. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.004>
- [9]. OSPAR Commission. Overview of the Impacts of Anthropogenic Underwater Sound in the Marine Environment; Report, 441; OSPAR Commission: London, UK, 2009.
- [10]. NATO Standardization Agreement N°1136 (STANAG). Standards for use when measuring and reporting radiated noise characteristics of surface ships, submarines, helicopters, etc. in relation to sonar detection and torpedo risk. NATO, Brussels, Belgium, 1995.
- [11]. Dekeling, R.P.A.; Tasker, M.L.; Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; Andersson, M.H.; André, M.; Borsani, J.F.; Brensing, K.; Castellote, M.; Cronin, D.; et al. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas; Part II: Monitoring Guidance Specifications, JRC Scientific and Policy Report EUR 26555 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2014. <https://doi.org/10.2788/27158>.
- [12]. Tichavska, M.; Cabrera, F.; Tovar, B.; Araña, V. Use of the Automatic Identification System in Academic Research. In *Computer Aided Systems Theory–EUROCAST 2015*; Moreno-Díaz, R., Pichler, F., Quesada-Arencibia, A., Eds.; EUROCAST 2015. Lecture Notes in Computer Science; Springer: Cham, Denmark, 2015; Volume 9520. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27340-2_5.
- [13]. Ainslie, M.A. Standard for measurements and monitoring of underwater noise. Part I: physical quantities and their units. Rep. No TNO-DV 2011 C235. TNO, The Hague, Netherlands, 2011.
- [14]. De Jong, C.A.F.; Ainslie, M.A.; Blacquiere, G. Standard for Measurements and Monitoring of Underwater Noise. Part II: Procedures for Measuring Underwater Noise in Connection with Offshore Wind Farm Licensing. TNO-DV 2011 C251. 2011.
- [15]. ISO 18405. Underwater acoustics. Terminology. ISO, Geneva, Switzerland, 2017.
- [16]. IEC 61260. Electroacoustics-Octave-band and fractional-octave-band filters-Part 1: Specifications. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2014.

ELABORACIÓN DE PAISAJES SONOROS PARA LA MONITORIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

Francisco Javier Rodrigo Saura¹

Jaime Ramis Soriano²

Eduardo Ruiz Perez¹

Pedro Poveda Martínez²

Jesús Carbajo San Martín²

¹ Sociedad Anónima de Electrónica Submarina S., M., E. Crta. Algameca, s/n, 30205, Cartagena, Murcia, España

² Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, 03080, San Vicente del Raspeig, España

RESUMEN

El ruido submarino antropogénico es una amenaza creciente para la vida marina debido al incremento de la actividad humana en el medio marino. En Europa se publicó la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo con el objetivo de establecer un marco de actuación comunitaria en el ámbito de la política medioambiental marina. La directiva introduce la energía acústica submarina, tal y como se detalla en el Descriptor 11, como fuente contaminante, por lo que se hace necesario realizar la monitorización y seguimiento de los niveles acústicos en el entorno marítimo. Se establecen dos metodologías para determinar el nivel de contaminación acústica submarina; la monitorización mediante el despliegue de hidrófonos y la elaboración de paisajes o mapas sonoros. El primer método requiere un despliegue de larga duración lo que implica un alto coste por lo que la elaboración de mapas sonoros es una alternativa real para establecer los niveles acústicos en una demarcación marítima determinada. En el presente trabajo se presentan las necesidades y procesos necesarios para la elaboración de paisajes sonoros en el contexto del proyecto: *Filling the gap: Thresholds assessment and impact beyond acoustic pressure level linked to emerging blue-growth activities* (SONORA) referencia PCI2022-135081-2.

ABSTRACT

Anthropogenic noise is a growing threat to marine life due to the increment of human activity in the marine environment. In Europe, the Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council was published with the aim of establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy. The directive introduces underwater acoustic energy, as detailed in Descriptor 11, as a polluting source, which makes it necessary to monitor and follow the acoustic levels in the maritime environment. Two methodologies are established to determine the level of

underwater pollution; monitoring through the deployment of hydrophones and the elaboration of landscapes or sound maps. The first method requires a long-term deployment, which implies a high cost, so the elaboration of sound maps is a real alternative to establish the noise levels in a given maritime area. This paper presents the requirements and processes needed for the elaboration of soundscapes in the context of the Project: *Filling the gap: Thresholds assessment and impact beyond acoustic pressure level linked to emerging blue-growth activities* (SONORA) reference PCI2022-135081-2.

Palabras Clave—Mapas Sonoros, Ray Tracing, Contaminación Acústica Submarina.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico mundial está generando un nivel creciente de actividades humanas en el entorno submarino.

En Europa, se publicó la Directiva 2008/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 2008 [1], bajo la denominación de Directiva Marco sobre la Estrategia Marina [Marine Strategy Framework Directive-MSFD], con el objetivo de establecer un marco de acción comunitaria en el ámbito de la política del medio marino. Esta directiva introdujo la contaminación acústica submarina, como se detalla en el Descriptor 11. La Decisión 2010/477/UE de la Comisión [2] sobre los criterios y normas metodológicas para el buen estado ambiental [Good Environmental Status-GES] de las aguas marinas propuso dos criterios: sonidos impulsivos fuertes, de baja y media frecuencia (C11.1.1) y sonidos continuos de baja frecuencia (C11.2.1). La implementación del Descriptor 11 de la MSFD fue seguida y apoyada por el Subgrupo Técnico de Ruido Submarino de la MSFD (TG Noise), que proporcionó definiciones y recomendaciones detalladas para monitorizar y medir su evolución [3]. Este grupo además definió que debido al coste económico y de recursos que supone realizar campañas de medidas en el mar, se pueden elaborar paisajes

sonoros o mapas de ruido submarino para realizar el seguimiento del nivel de contaminación acústica y establecer las medidas correctoras para reducir el impacto en la fauna y flora marina alcanzando el buen estado medioambiental (GES).

Al igual que cualquier sistema de comunicaciones, el paisaje sonoro submarino está determinado por la fuente, propagación en el medio de transmisión, agua de mar en este campo de aplicación, y características y propiedades del receptor, según la normativa aplicable o las características acústicas del impacto en fauna y flora dependiendo del caso de uso.

Para la elaboración de los paisajes sonoros hay que considerar las fuentes de ruido submarino, tanto de origen natural como antropogénico, la propagación acústica submarina y sus peculiaridades y los parámetros acústicos y ancho de banda de interés en función del objetivo del paisaje sonoro.

El objetivo de este trabajo es proporcionar información sobre los aspectos relevantes para la elaboración de paisajes sonoros o mapas acústicos submarinos mostrando casos prácticos elaborados mediante las aplicaciones desarrolladas por SAES.

El artículo se divide en un total de seis apartados; el primer apartado corresponde a la introducción, el segundo a la caracterización del ruido submarino, el tercero a la identificación de fuentes de ruido, el cuarto a la descripción de conceptos generales relativos a la propagación acústica y modelos de propagación, el quinto a la elaboración de los mapas de ruido y el sexto y último a las conclusiones.

2. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES DE RUIDO SUBMARINO

Un mapa sonoro se puede definir como la representación espacial, normalmente en tres dimensiones, del nivel de un parámetro acústico determinado, comúnmente el nivel de presión sonora [Sound Pressure Level-SPL], para una frecuencia y ancho de banda determinado. Así, antes de elaborar el mapa sonoro para realizar el seguimiento de la contaminación submarina de una zona de estudio es necesario definir los parámetros acústicos característicos que definen las fuentes sonoras presentes en dicha zona de estudio.

Las fuentes sonoras se caracterizan por; Frecuencia (Hz) de emisión, Intensidad/ Nivel de fuente (dB ref 1 μ Pa @ 1 m), Duración (s ó ms), Ciclo de Trabajo (%), Ancho de Banda (Hz), Direccionalidad, Potencia de Salida (W) y Persistencia.

El ruido radiado por fuentes sonoras se clasifica en dos grupos principales:

- Ruido continuo. Ruido generado de manera continua en el tiempo que puede ser de dos tipos; ruido de banda ancha o ruido de espectro continuo y ruido de banda estrecha, correspondiente a un ruido discontinuo en frecuencia consistente en tonos o

componentes senoidales teniendo un espectro con componentes lineales o frecuencias discretas. El ruido radiado normalmente existe como un espectro continuo sobre el cual existen tonos superpuestos. Tanto las componentes continuas como las discretas decrecen al aumentar la frecuencia.

- Ruido impulsivo. Ruido de corta duración, que puede ser repetitivo o no en función de la fuente. Está caracterizado por señales de alto nivel de presión sonora, espectro discreto y corta duración.

En la Figura 1 se muestra el ruido típico de banda ancha y de banda estrecha generado por un buque y ruido impulsivo generado por mamíferos marinos.

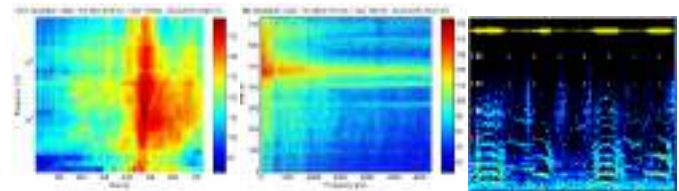


Figura 1. Ruido submarino de banda ancha (izquierda), ruido de banda estrecha (centro) y ruido impulsivo (derecha).

3. FUENTES DE RUIDO SUBMARINO

El ruido submarino es generado por la superposición del ruido generado por la actividad antropogénica en el entorno marítimo y el ruido ambiente existente en el área de estudio. En esta sección se realiza una descripción de las fuentes de ambos tipos de ruido.

3.1. Definición de ruido ambiente

La definición de ruido ambiente ha evolucionado a lo largo de los años, principalmente debido al desarrollo de nuevas aplicaciones y sistemas acústicos submarinos y la aparición de nuevas fuentes de ruido antropogénico. Inicialmente, la definición de ruido ambiente se centró en el análisis de la capacidad de detección de los sistemas de sonar. Urlick [4] definió el ruido ambiente como aquella parte del ruido de fondo total que se puede observar usando un hidrófono no direccional, pero que no se debe al hidrófono y su forma de despliegue (ruido propio o self-noise), o a alguna fuente localizada identificable de ruido.

El ruido ambiente se define como todo sonido, excepto el resultante del despliegue, funcionamiento o recuperación del equipo de grabación y su plataforma asociada, en el que se incluye tanto sonidos naturales como antropogénicos [6].

En el pasado, las fuentes de ruido ambiente se clasificaron como fuentes físicas, biológicas y artificiales [7]. Hoy en día, las fuentes de ruido pueden clasificarse como ruido natural y artificial a efectos del desarrollo de estudios sobre la evolución y el impacto de la contaminación acústica

en el medio marítimo. Las fuentes naturales de ruido incluyen sonidos de origen físico y biológico, y pueden denominarse geofonías o biofonías [5].

3.2. Fuentes de ruido antropogénicas

Las principales actividades antropogénicas generadoras de ruido submarino son; ruido generado en dragados y construcciones, ruido generado en perforaciones y producciones de gas y petróleo, ruido generado por el transporte, incluyendo tráfico marítimo y aéreo, ruido generado en investigaciones geodésicas, ruido generado por sistemas SONAR activos, ruido generado en explosiones submarinas y ruido generado en estudios oceanográficos científicos.

La principal fuente de contaminación acústica submarina es el tráfico marítimo [8-12]. El ruido generado por el tráfico marítimo es una combinación de sonidos tonales y ruido de banda ancha repartidos en el rango de frecuencia entre 2 Hz y 100 kHz, y se genera principalmente por la cavitación de la hélice, la maquinaria de a bordo y las turbulencias generadas alrededor del casco [10] y [11].

3.3. Posicionamiento de las fuentes de ruido antropogénicas

Para la elaboración de los paisajes sonoros es necesario localizar las fuentes de ruido antropogénico, considerando el ruido ambiente homogéneo en el área de estudio. De acuerdo con las fuentes de naturaleza antropogénica descritas anteriormente, a excepción del tráfico marítimo, se pueden considerar estáticas, con lo que su localización es conocida.

Para la localización de los buques usualmente se utiliza el sistema de identificación automática [Automatic Identification System-AIS]. El sistema AIS proporciona para cada buque el número de identificación del servicio móvil marítimo (MMSI), el tipo de buque, sus posiciones y su rumbo y velocidad. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de información AIS en la costa española, donde se puede observar el tipo de buque, de acuerdo al color del símbolo utilizado, y las líneas de densidad de tráfico marítimo obtenida de www.marinetraffic.com.

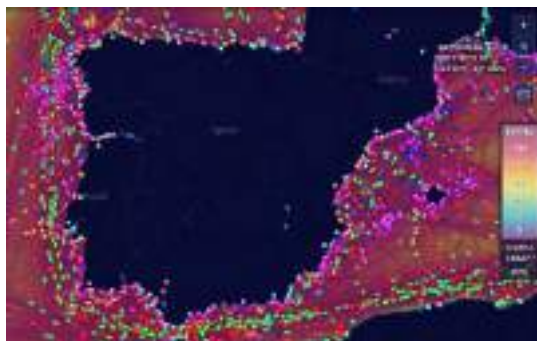


Figura 2. Ejemplo de la información AIS en la costa española obtenida en www.marinetraffic.com.

4. LA PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBMARINA

Para la elaboración de un paisaje sonoro submarino es imprescindible conocer los fenómenos básicos de propagación acústica en el medio y en concreto en el área de estudio. La propagación acústica es modelada mediante modelos de propagación de son introducidos en este apartado.

4.1. Descripción de conceptos generales

La propagación del ruido radiado por una fuente acústica submarina depende de factores como la temperatura y la salinidad del agua de mar (en función de la profundidad), profundidad del fondo, tipo de fondo y profundidad de calado de la fuente sonora.

La velocidad del sonido (c) en el mar suele estar comprendida entre 1450 y 1540 m/s. La velocidad del sonido puede medirse directamente, pero es habitual su cálculo mediante fórmulas empíricas en función de la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), la salinidad S (psu) y la presión, que es proporcional a la profundidad D (m). Existen diferentes expresiones para el cálculo de la velocidad del sonido como por ejemplo la publicada por Mackenzie [13], Medwin [14] y Leroy [15].

El agua de mar suele presentar estratificación de densidad, es decir, los gradientes horizontales de densidad son miles de veces más pequeños que los gradientes verticales. A su vez, la densidad está determinada por la salinidad y la temperatura de forma que distintas combinaciones de estas dos variables pueden dar lugar a la misma densidad. En consecuencia, la estratificación de densidad no implica necesariamente una estratificación de salinidades y de temperaturas. No obstante, también estas variables suelen presentar gradientes horizontales muy pequeños, salvo en las desembocaduras de ríos y estuarios, en zonas afectadas por deshielos o por lluvias recientes o en los márgenes de las grandes corrientes oceánicas. Por lo tanto, en una primera aproximación puede suponerse que la velocidad del sonido es también una variable que presenta estratificación horizontal y que varía solo en sentido vertical.

La representación de la velocidad o la temperatura en función de la profundidad se denomina traza baticerimétrica [Sound Velocity Profile-SVP] y traza batitérmica, respectivamente. Una traza típica se puede dividir en cuatro zonas:

- **Capa superficial.** Abarca desde la superficie hasta los 50 m. Está afectada por el calentamiento de la radiación solar y los efectos meteorológicos.
- **Termoclina estacional.** Presenta un gradiente negativo cuya intensidad varía con la época del año. En verano y otoño suele ser muy pronunciada porque las aguas superficiales son muy cálidas, pero en primavera e invierno puede confundirse con la capa de mezcla.
- **Termoclina permanente.** Abarca desde el final de la termoclina estacional hasta los 1600 m

aproximadamente. Presenta un gradiente negativo suave y uniforme de temperatura. Se ve poco afectada por los cambios estacionales.

- Isoterma profunda. La temperatura permanece constante, de manera que la velocidad aumenta con la profundidad.

El nivel de presión sonora que llega a un punto del espacio RL (Received Level) viene determinado como el nivel de fuente radiado SL menos las pérdidas de transmisión TL (Transmission Loss). Las pérdidas por transmisión se refieren a la atenuación de la señal acústica debido a la pérdida de intensidad cuando la onda se desplaza por el medio. Depende fundamentalmente de la divergencia y la absorción, aunque también se producen pérdidas por transmisión por rebote en superficie y fondo.

4.2. Descripción de los modelos de propagación

Para la elaboración de paisajes sonoros submarinos se utilizan modelos de propagación para calcular las pérdidas por transmisión en cada punto del espacio.

Los modelos de propagación de acústica submarina suelen resolver la ecuación de ondas, o ecuación de Helmholtz generalmente para una frecuencia determinada y siendo necesario para modelar las señales de banda ancha un modelo en el dominio del tiempo. Alternativamente, se calcula una solución para cada frecuencia o banda de frecuencia en todo el rango de frecuencia requerido con el uso de una transformada inversa adecuada, dependiendo del parámetro acústico del que sea necesario elaborar el paisaje sonoro. No todos los modelos de propagación considerarán todos los factores ambientales que pueden influir en la onda que se propaga.

En general, las soluciones del modelo de propagación se pueden dividir en tres grandes clases según i) las características de frecuencia de la fuente; ii) la dependencia ambiental de la región de propagación; y iii) la profundidad del agua. Los modelos dentro de la clase ii) generalmente se clasifican como independientes o dependientes de la distancia fuente – receptor en función de si los parámetros ambientales como la profundidad del agua y velocidad del sonido, se mantienen fijos con la distancia o no. Los modelos dependientes de la distancia es la opción preferida cuando las condiciones de batimetría o columna de agua cambian a lo largo del camino de propagación.

Actualmente, los modelos de propagación se clasifican comúnmente según el método de cálculo utilizado en los siguientes grupos [16-17]:

- Trazado de rayos.
- Modo normal (Teoría de ondas).
- Ecuación parabólica.
- Integración del número de onda.
- Flujo de energía.
- Modelos de diferencias finitas y elementos finitos.

- El método de imagen [18].
- Modelos multi-trayecto [19].

Para la elaboración de paisajes sonoros submarinos, SAES utiliza los modelos de propagación integrados en la herramienta SEAPROOF, basada en el empleo del modelo de trazado de rayos. El modelo de propagación utilizado ha sido verificado por el Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE) de la OTAN situado en La Spezia, Italia, lo que asegura la precisión de las estimaciones realizadas. En la Figura 3 se muestra el trazado de rayos obtenido con el modelo de propagación de SAES para un perfil de velocidad (SVP) determinado.

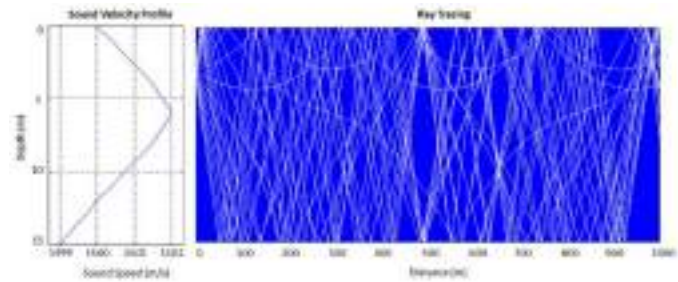


Figura 3. Trazado de rayos obtenido con el modelo de propagación de SAES para un perfil de velocidad (SVP) determinado.

Como se puede observar, el modelo obtiene el trazado de rayos en función del perfil de velocidad (SVP) incluyendo el camino directo, rebotes en superficie y fondo. A partir de los rayos sonoros, se calcula las pérdidas por transmisión en cada punto del espacio. El modelo de propagación desarrollado por SAES es un modelo dependiente de la distancia considerando además los efectos de reverberación.

5. ELABORACIÓN DE PAISAJES SONOROS O MAPAS DE RUIDO SUBMARINO

En la Figura 4 se muestra un diagrama de bloques de los pasos necesarios para la elaboración de paisajes sonoros.

Para la elaboración de paisajes sonoros, es imprescindible tener caracterizadas las fuentes de ruido que estarán presentes en la zona de estudio y su posición. La caracterización de las fuentes se puede realizar a partir de medidas acústicas en condición de operación normal mediante el despliegue de hidrófonos. Alternativamente, y de manera específica para la elaboración de paisajes sonoros que incluyen el tráfico marítimo se puede usar una base de datos de caracterización del ruido radiado por buques, en base a medidas realizadas previamente o modelos teóricos de fuente.

En cuanto a la localización de las fuentes, a excepción del tráfico marítimo, serán estáticas, por lo que su posición puede ser fácilmente conocida. Cuando se trata de tráfico

marítimo, los datos del tipo de buque y posición puede ser obtenida de aplicaciones web de datos AIS.

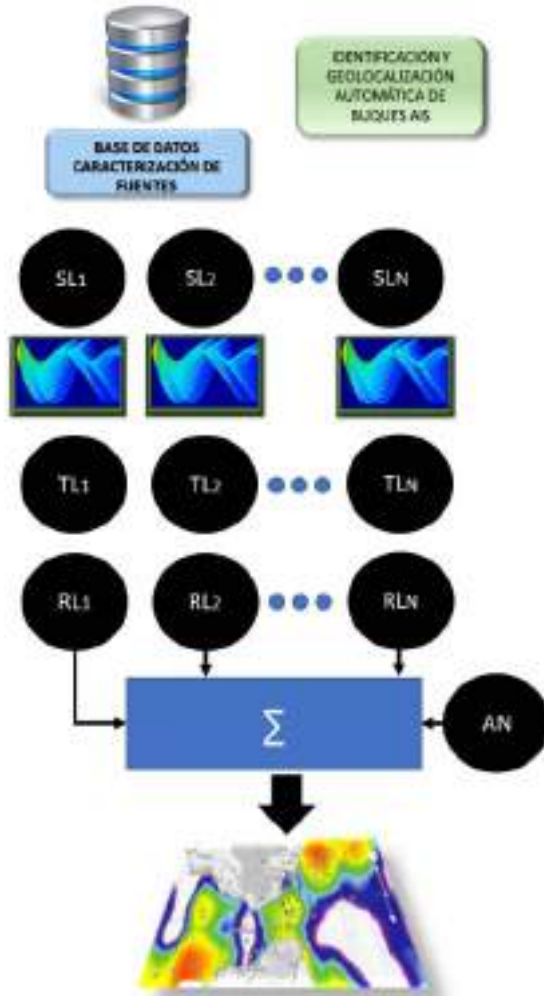


Figura 4. Diagrama de bloques para la elaboración de paisajes sonoros submarinos.

Una vez identificada, caracterizada y posicionada cada fuente, es necesario calcular las pérdidas por transmisión utilizando modelos de propagación. Los datos medioambientales, y en particular el perfil de velocidad puede ser medido, aunque es preferible debido a su variabilidad con el tiempo que se utilicen datos estadísticos de diferentes fuentes de uso público

Calculadas las pérdidas de propagación para cada punto del espacio y fuente, se realiza la suma incoherente de la aportación del nivel de ruido de cada una de las fuentes a cada punto espacial. Finalmente, al nivel de ruido obtenido RL en cada punto espacial se superpone el ruido ambiental AN en función del estado de la mar, viento y lluvia. El ruido ambiental AN se considera homogéneo en el área de estudio por lo que se aplican los mismos niveles a todos los puntos espaciales.

La representación de cada nivel acústico obtenido se puede realizar de manera gráfica sobre un mapa geográfico usando un diagrama de colores para representar los distintos niveles de ruido.

En la Figura 5 se muestra el paisaje sonoro elaborado para el Puerto de Cartagena. En este caso de estudio se elabora el paisaje sonoro para el seguimiento de la contaminación acústica generada por el tráfico marítimo de acuerdo con [1].

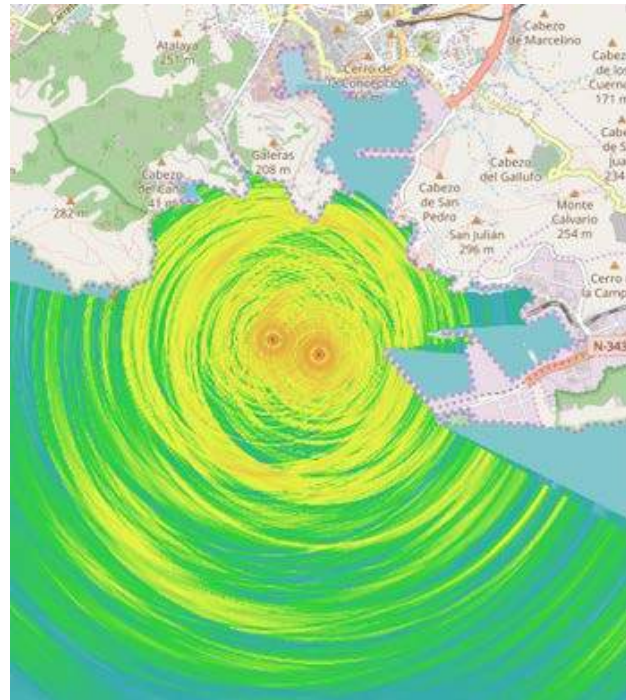


Figura 5. Paisaje sonoro realizado en el Puerto de Cartagena.

Para la elaboración de este paisaje sonoro hay que considerar:

- Se realiza el seguimiento del descriptor C11.2.1 promulgado en la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina [1].
- La caracterización acústica de los buques se ha realizado a partir del análisis de un conjunto de medidas realizada durante 3 años en las inmediaciones del Puerto de Cartagena,
- La detección y seguimiento de los buques se ha realizado utilizando un sistema AIS instalado en el área de estudio.
- El modelo de propagación utilizado es un modelo de trazado de rayos implementado en la aplicación SEAPROOF desarrollada por SAES.
- Los datos medioambientales para el cálculo del ruido ambiente AN fueron obtenidos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

6. CONCLUSIONES

El presente estudio presenta los fundamentos teóricos generales y el proceso necesario para la elaboración de paisajes sonoros submarinos con el objetivo de realizar el seguimiento de contaminación acústica submarina en un área de estudio.

Para la elaboración de paisajes sonoros es necesario integrar un conjunto de aplicaciones software que permitan obtener el nivel de ruido en cada punto espacial del área de estudio. Las herramientas software y en particular el modelo de propagación utilizado debe ser evaluado previamente con el objetivo de garantizar la precisión de los valores de ruido obtenidos.

En el contexto del proyecto SONORA, SAES y la Universidad de Alicante realizará paisajes sonoros en las inmediaciones principalmente de granjas de acuicultura con el objetivo de evaluar el impacto del ruido en el comportamiento de las especies.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado por SAES y la Universidad de Alicante en el contexto del proyecto: Filling the gap: Thresholds assessment and impact beyond acoustic pressure level linked to emerging blue-growth activities (SONORA) referencia PCI2022-135081-2.

REFERENCIAS

- [1]. European Parliament and Council. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Marine Environmental Policy (Marine Strategy Framework Directive); European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. European Union, (L. 164, 19-40, 2008.
- [2]. European Commission. Decision 2010/477/EU of the European Commission of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters. European Parliament and Council: Strasbourg, France, Off. J. Eur. Union, (L. 232, 14-24, 2010.
- [3]. Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; André, M.; Brensing, K.; Dalen, J.; Dekeling, R.P.A.; Robinson, S.; Tasker, M.L.; Thomsen, F.; Werner, S. European Marine Strategy Framework Directive-Good Environmental Status (MSFD GES); Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy; Miliu Ltd., Brussels, Belgium, 2012.
- [4]. Urick, R.J. Principles of Underwater Sound, 3rd ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1983.
- [5]. Dekeling, R.P.A.; Tasker, M.L.; Van der Graaf, A.J.; Ainslie, M.A.; Andersson, M.H.; André, M.; Borsani, J.F.; Brensing, K.; Castellote, M.; Cronin, D.; et al. Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas; Part II: Monitoring Guidance Specifications, JRC Scientific and Policy Report EUR 26555 EN;

Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2014. <https://doi.org/10.2788/27158>.

- [6]. Mitson, R.B.; Knudsen, H.P. Causes and effects of underwater noise on fish abundance estimation. *Aquatic Living Resources*. 2003, 16, 255–263. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(03\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(03)00021-4).
- [7]. Farina, A. *Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7374-5>.
- [8]. Ross, D. On ocean underwater ambient noise. *Inst. Acoust. Bull.* 1993, 18, 5–8.
- [9]. Ross, D. Ship sources of ambient noise. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2005, 30, 257–261. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850879>.
- [10]. Hildebrand, J.A. Sources of Anthropogenic Sound in the Marine Environment. International Policy Workshop on Sound and Marine Mammals, London, UK, 28–30 September. 2004. Available online: <https://www.mmc.gov/wp-content/uploads/hildebrand.pdf>.
- [11]. McDonald, M.A.; Hildebrand, J.A.; Wiggins, S.M.; Ross, D. A 50 years comparison of ambient noise in Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *J. Acoust. Soc. Am.* 2008, 124, 1985–1992. <https://doi.org/10.1121/1.2967889>.
- [12]. Merchant, N.D.; Witt, M.J.; Blondel, P.; Godley, B.J.; Smith, G.H. Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and automatic identification system (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin*. 2012, 64, 1320–1329. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.004>.
- [13]. Mackenzie, K.V. Nine-term equation for sound Speed in the Oceans. *J. Acoust. Soc. Am.* 1981, 70, 807–812. <https://doi.org/10.1121/1.386920>.
- [14]. Medwin, H. (1975). Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58, pp. 1318-19.
- [15]. Leroy, C. C.: Development of Simple Equations for Accurate and More Realistic Calculation of the Speed of Sound in Sea Water, *JASA*, 46:216 (1969).
- [16]. Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., and H. Schmidt, 2011, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd edition., Springer.
- [17]. Etter, P. C., 2013, *Underwater Acoustic Modelling and Simulation*, 4th edition. CRC Press.
- [18]. Brekhovskikh, L. M., 1980, *Waves in Layered Media*, 2nd edition., Academic press.
- [19]. Weinberg, H., 1975, Application of ray theory to acoustic propagation in horizontally stratified oceans, *J. Acoust. Soc. Am.*, 58 (1), 97-109.

ANALYSIS OF THE UNDERWATER SOUNDSCAPE USING ECOACOUSTIC INDICES: ACOUSTIC STUDY OF UNDERWATER AREAS IN THE MEDITERRANEAN SEA

Bautista Parra, Nerea^{1}; Affatati, Alice²; Poveda Martínez, Pedro^{1*}; Carbajo San Martín, Jesús^{1*};
Ramis Soriano, Jaime^{1,2*}*

¹ Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante

² Geophysics Research Section 1, National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (OGS),
Trieste, Italy

ABSTRACT

Ecoacoustics investigates sound to understand its properties, its evolution, and its function in the environment. Ecoacoustic analysis is becoming an important tool of quantifying the ecological aspects of the landscape (terrestrial or underwater), where living beings need to establish an acoustic communication between them. This soundscape is complex and requires procedures to transform the collected data into information that is useful for understanding the environment. In this case, these are the ecoacoustic indices. The purpose of this work is to study the acoustic behaviour of two underwater environments (using the second only for comparison) by means of the ecoacoustic indices analysed in the first part of the work. Different results are obtained in which common patterns and differences can be identified, with the final objective of discussing the viability, or lack thereof, of these indices in underwater environments.

Keywords— ecoacoustic indices, anthropophony, biophony, soundscape, underwater acoustics.

1. INTRODUCTION

Ecoacoustics, known as the study of environmental sound, is becoming an important way of quantifying the ecological aspects of the landscape, as mentioned in the first part of this work.

In this second part, after learning how ecosystems are generally studied using ecoacoustic indices, a change of approach to these reference studies is sought by applying these indices to an environment that differs from terrestrial ones, an underwater soundscape.

Acoustic landscapes are generally defined as “soundscapes” formed by the different sound sources that manage to reach the location of a sound receptor, which can be an animal or, as in the case study, a sound acquisition system [1]. The concept of soundscape was first introduced in the «World Soundscape Project», led by R. Murray Schafer [2]. The project was developed as a way of describing how humans perceive sounds in a particular area at a particular time. The concept is important for understanding how sound affects the health and quality of life of those who live there, among other factors.

However, this differs in water, as underwater acoustics does not include elements of perception due to uncertainty in the knowledge of how marine animals process and understand sounds.

The underwater soundscape has different spectral, temporal, and spatial characteristics. There is currently no standard metric to characterise underwater soundscapes, although their assessment with ecoacoustic indices has been widely used in recent years.

The intention of this work is to show the results of the ecoacoustic indices shown in the first part of the work (Acoustic Complexity Index, ACI [3]; Normalised Difference Soundscape Index, NDSI [4]; Acoustic Entropy Index, H [5]; Temporal Entropy, H_t [5]; Spectral Entropy, H_f [5]; Acoustic Richness, AR [6]; Median of amplitude envelope M [6]; Acoustic Diversity Index, ADI [7]; Acoustic Dissimilarity Index, D [5]). These results differ, to a greater or lesser extent depending on the case, from the reference studied in the theoretical part. Therefore, this study serves primarily to investigate the viability of these indices and to understand what is happening in an underwater soundscape.

* **Contact author:** nbp27@alu.ua.es; pedro.poveda@ua.es; jesus.carbajo@ua.es; jramis@ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area

The main area chosen for the study is the bay of El Gorguel (37°33'55.3" N, 0°52'26.9" W), located in El Gorguel, Murcia (Spain). The recorded files and information regarding location and sample collection were provided by the research team of the Gandía Campus of the *Universitat Politècnica de València* (UPV) and the *Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras*. The coastal area analysed shows sources of anthropogenic noise due to maritime navigation on the coast of Cartagena, close to the study area.

Throughout the study and given the high presence of anthropogenic noise in the recordings collected in El Gorguel, it was decided to compare the results of the various indices obtained by incorporating other types of recordings that did show marine biodiversity. These secondary recordings were taken in a marine reserve near Tabarca island, close to the coast of the province of Alicante (Spain). Unfortunately, the coordinates or position of the device on the seabed used were not known.

2.2. Materials and sound recording

For the recording of the audio files a mooring system was used with the following elements: anchor weight, acoustic releaser, passive acoustic recorder (known as SAMARUC) and depth buoys. All of these are joined together by two high strength connecting ropes. One of them connects the parts that will be recovered at the end, while the other is used to connect the acoustic release and the anchor weight, which are lost after the recovery of the rest of the system. This separation is made by the acoustic release, which has two units (depth and surface) that communicate between them.

The most important element is the SAMARUC unit. It contains the sound recorder, the Cetacean Research® C57 hydrophone. All electronics and batteries are protected inside a sealed metal cylinder, while the hydrophone is kept on the outside of the cylinder surrounded by a protective cage.

In total, three mooring campaigns were analysed in El Gorguel for the collection of the acoustic recordings used in this analysis. Including the day of anchoring and collection, the campaigns have a duration of 24 (15th May 2018 to 07th June 2018), 48 (07th June 2018 to 24th July 2018) and 48 (25th October 2018 to 11th December 2018) days, respectively.

In the secondary zone of the marine reserve in Tabarca, only 5 recordings were selected out of many more, collected using the Ocean Instruments SoundTrap 300 STD hydrophone from Ocean Instruments®. The reduced choice is because they are only used to calculate the D index [5]. Its calibration sensitivity is -184.1 dB.

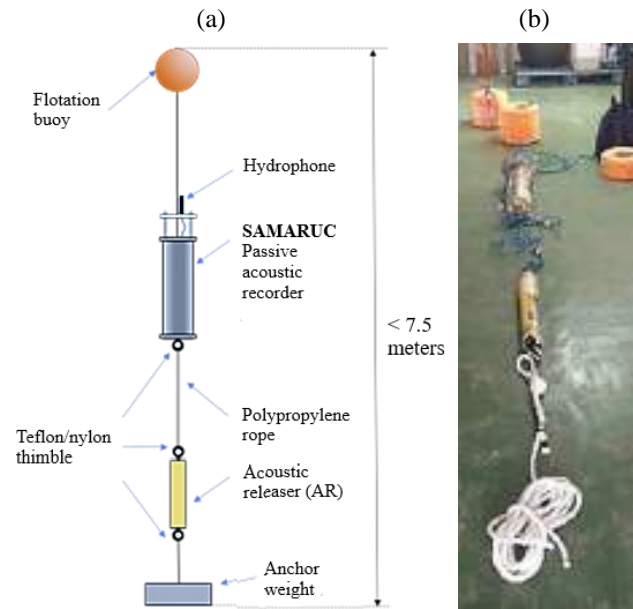


Figure 1. (a) Basic drawing of the mooring system. (b) Picture of the real mooring system, except for the anchor weight.

2.3. Data processing

The sampling frequency (f_s) used in El Gorguel was 9.6 kHz in the first two campaigns, while the last one was recorded at 48 kHz. To avoid this difference and to facilitate the comparison, the sampling frequency was limited to the minimum, so that all recordings would have an f_s of 9.6 kHz. However, the results were also studied with the original frequencies.

The duty cycle used was 5 minutes of recording and 10 minutes of rest. Some recordings were eliminated, as the hydrophone picked up its entry and exit from the water, as well as the sound of human voices of the staff who worked on the positioning. These recordings are not suitable for the study and, although worth mentioning, will not be included. This would leave a total of 9753 recordings in this area. In the underwater environment of Tabarca, the files had 1 minute of non-stop recording.

The reference sound pressure underwater is 1 μPa (as opposed to 20 μPa in air) and the sensitivity for the complete measuring equipment used is -167 dB re 1V/ μPa .

For the analysis of acoustic files, most of the literature reviewed relies on the use of two libraries or packages called *seewave* [8] and *soundecology* [9]. Both provide functions to perform the calculation of different indices. Calculations of other acoustic parameters have been made with *PAMGuide* [10] which shows in a more organised and accurate way the environmental sounds collected in different soundscapes. It can be used in *MATLAB* as well as in *R*.

3. RESULTS

3.1. Differentiated events in the recordings

Events have been differentiated using the spectral representation of the files. Given the massive amount of data collected, it is useful both in the analysis and in the understanding of the results obtained. The events differentiated in El Gorguel are:

1. Ship engine sounds (Fig. 2a): shows the engine sound of the different ships in the area. In some cases, the energy level represents the acceleration and deceleration of the ships, or movements of approach and distance from the hydrophone.
2. Mechanical punctual sounds (Fig. 2b): slightly impulsive noises are displayed, lasting at most a few seconds. They sound like the sounds of dragging, or a motorised tool being activated and then stopped after a short time. There are also very impulsive sounds, lasting milliseconds, which belong to the triggering of a tool called *lupara*, a type of sawed-off shotgun used in nearby fish farms.
3. Continuous tonal noise over time (Fig. 2c): displays noise that has components of a certain frequency. Mostly there is a continuous noise that seems to come from some engine or machine. In some cases, they are clearly generated by a ship. In other cases, the sound source is hardly recognizable.
4. Discontinuous noise caused by metallic collisions (Fig. 2d): similar to no. 2, it is different in that the spectrum shows shorter and lower energy sounds that could be the collision of fish cages in the fish farm or some other metallic element.
5. Apparent silence (Fig. 2e): recordings occur in which “nothing is heard” apart from a low-frequency noise comparable to the sound of running water or falling water hitting a surface. It can also be seen in spectral representations of previous events, although it is sometimes overlapped or completely cancelled. The event is spectrally similar to no. 3 with a lower energy level. It could be the case that some of the sounds collected are from biological sources, such as the gilt-head seabream or sea bass that inhabit the fish farm or other living things on the seabed. Some of these sounds are produced at a frequency of approximately 400-500 Hz, while others reach the 3 kHz band.

In general, in 2018, there are no major differences in noise levels in the area due to the change of season. In all of them the marine traffic is reflected in the hours of sunshine, while at night the activity relaxes.

Different marine species coexist on the island of Tabarca, such as groupers, gilt-head bream and other types of fish, molluscs, turtles, etc.

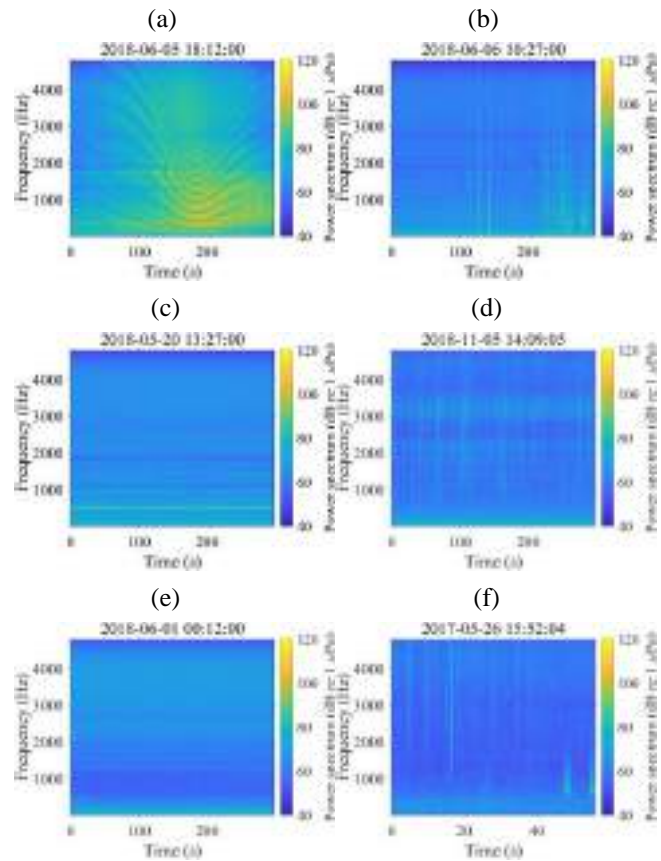


Figure 2. Examples of sounds collected by the SAMARUC unit divided by events: sounds emitted by passing ships (a), mechanical punctual sounds (b), continuous tonal noise over time (c), discontinuous noise caused by metallic collisions (d), apparent silence (e). The last figure shows a recording collected by another unit in Tabarca (f).

The audio files show some grouper vocalisations (known as booms) and some gilt-head seabream croaks. These booms are located below 500 Hz, while the croaks are concentrated between 0.5 kHz and 1 kHz. At higher frequencies, high-pitched clicks, belonging to crabs, can be heard (Fig. 2f).

3.2. Ecoacoustic indices

To show the results obtained, representations show the results of each index averaged for each event. This average was obtained from a selection of files from each of the campaigns that fulfil the conditions described in each event.

The ACI (Fig. 3a) results in maximum values generally higher than 160, never exceeding the value of 190. This value is not high if we consider that some studies have provided values higher than 3500 [11]. The moment where the ACI is somewhat higher is in event 4 (metallic collisions), although the variance is high. In this event, there is a greater number of intensity variations with numerous amplitude peaks.

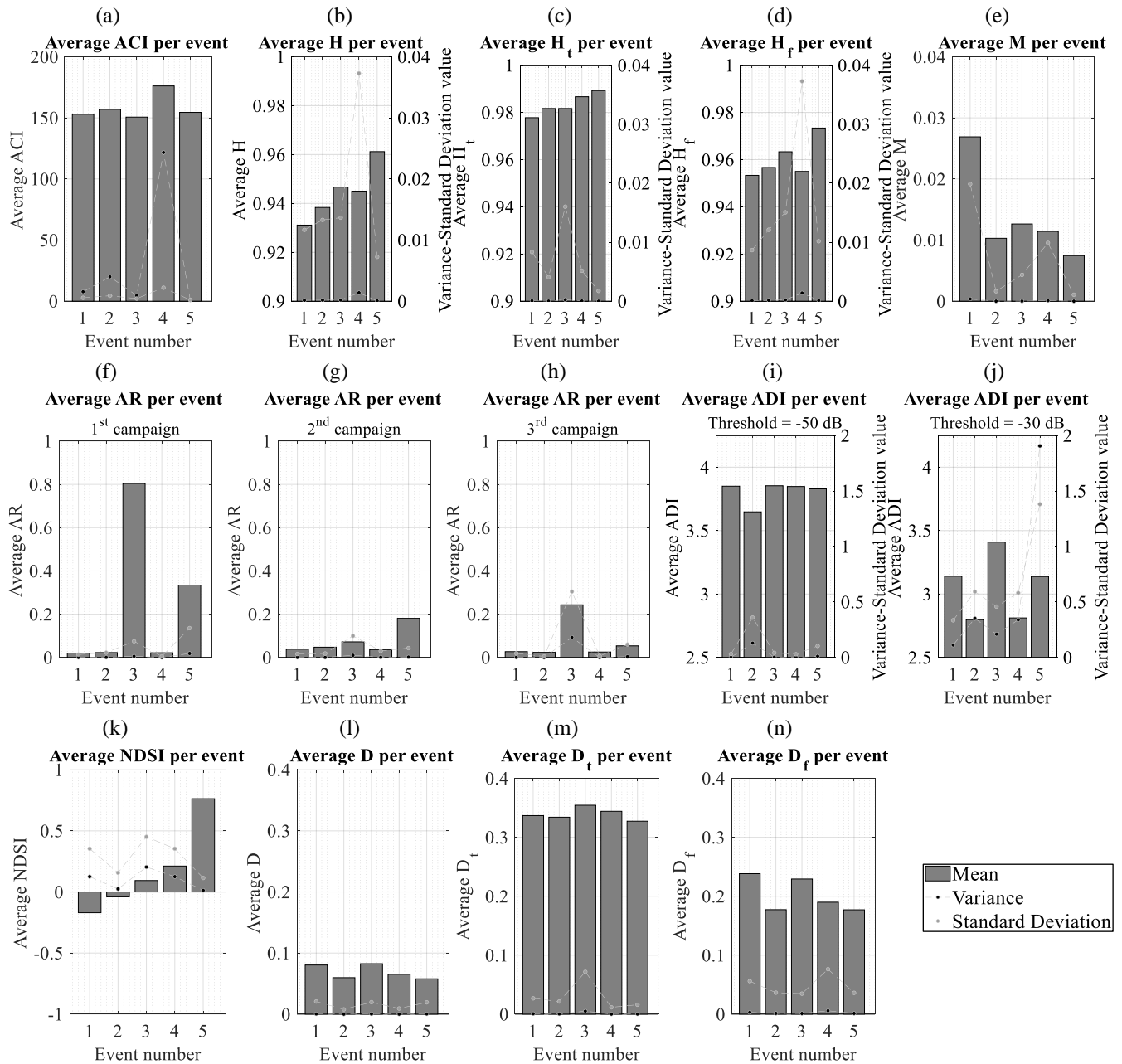


Figure 3. Bar chart of the different ecoacoustic indices averaged over the campaigns calculated for all events.

However, this amplitude is not very high, resulting in a higher ACI, but not very high compared to other soundscapes. Impulsive sounds do not stand out too much from the background noise and, generally, the presence or absence of ships does not seem to affect this index too much. The rest of the events have approximately the same ACI values, being perhaps somewhat lower in event 3 or 5, where the sound remains mostly continuous without abrupt differences in amplitude.

In the calculation of H (Fig. 3b), both H_t (Fig. 3c) and H_f (Fig. 3d) are considered. Analysing first H_t , it is generally high in all the campaigns, approaching the maximum value for this index. The minimum value is obtained in recordings that are part of event 1. However, not all ship traffic sounds produce minima. These are those that are very concentrated temporally in one part of the recording, covering practically the whole spectrum in a certain period. The sounds produced by the active machinery of ships result in a more uniform occupation of the frequency spectrum, resulting in lower

temporal entropy. However, the value obtained is particularly high even in its minimums. Analysing the H_f , it has a greater differentiation between maxima and minima. The situation is similar to H_t , but on a different axis. In this case, recordings close to event 3 are lower, as there is a continuous sound in time at a certain frequency that could be produced by machinery or dragging procedure. The conclusions are the same as those given in the case of H_t , but on the frequency axis. On the other hand, the maximum values of this index are generally lower than for H_t . However, event 5 still gives higher values. Finally, H provides values similar to those of H_f , lower given the influence of H_t . This index increases from 0 to 1 in more heterogeneous signals, so that higher values of H would indicate richer and more diverse habitats, more random sounds, and a lower presence of strictly pure tones. In the reference, it is mentioned that noises caused by wind, water or human activities could reduce the reliability of H [5]. In this case, it would be expected that the most continuous sounds, temporally or spectrally (such as events 1 and 3), would give very different minimums from the rest and that events with a more “random” sound, such as 2 or 5, would maximise the values. This, in practice, is not entirely rigorous. There are recordings where this assumption holds true and, at the same time, there are very similar recordings that give different values. In short, the deep sea is a chaotic and very noisy environment that makes it difficult for the entropy indices to perform, so working with them underwater is not recommended.

The AR results (Fig. 3f, g, h) depend on the set of input files. Having campaigns that differ in their number of files, the comparison between them is not viable. The M index (Fig. 3e), that ranges from 0 to 1, provides small values. It is calculated using the median of amplitude envelope, so it will be higher where the envelope remains higher for a larger number of samples, such as in those events where there are sustained ship sounds (event 1 or 3) and even numerous high amplitude levels but presented discontinuously (event 4). An increase in the M index does not directly translate into an increase in AR due to the way the files are classified. M showed higher values in event 1, while AR remains minimal. This may be due to H_t values dropping in the presence of highly concentrated ship noise. Those campaigns with fewer archives show higher values. Although these recordings do not explicitly show distinct animal species, the index is not rigorous, showing relatively high values in recordings that, in principle, have a very low overall activity.

The ADI has been obtained twice, assigning a size of 100 Hz to each frequency bin and a threshold of -50 dB (Fig. 3i) and -30 dB (Fig. 3j). The first one, taken from the reference [7] and lower, takes more background noise, resulting in very high results with little difference. The -30 dB threshold results in much more oscillations of values and minimum peaks where the trend at -50 dB was almost flat. It shows minima when the energy level is kept at low and almost constant levels except at one point, which differs from the rest

by a noticeable number of decibels depending on the case. These recordings could be similar to those analysed in event 2, where punctual sounds were produced. This index is higher the more uniform the frequency bands are. Therefore, it is understandable that events 3 and 5 are the highest, as they show more constant values over time. Also, depending on the case and the continuity of the sound emitted by the ships, event 1 may provide high values. Meanwhile, those events with more punctual sounds (events 2 and 4) are lower. Event 5 (apparent silence) shows a large deviation due to an unexpected initial sound effect (a small backfire sound) at the beginning of the recordings in the 3rd campaign, which greatly decreases the ADI obtained.

For the calculation of the NDSI (Fig. 3k), in underwater environments it is often the case that the majority of biotic sounds occur at very low frequencies, so that biophony may occur below anthropophony. There may also be masking of biological sounds in the presence of mechanical signals. However, due to several problems, it was decided to follow the reference [4], adapting the function to the f_s of 4.8 kHz. The NDSI oscillates between values of -1 and 1. In all the campaigns, in the time slots close to 00:00 (GMT/UTC + 1), the NDSI tends to be higher, with values above 0.5, while as ship traffic begins to occur, these values decrease below 0, showing periodicity. The maximum values for the NDSI correspond to event 5 (apparent silence). Although the choice of the frequency bands chosen did not seem to be a good determinant, the results made possible to detect vocalisations of living beings when the sound of ships disappears. The absence of the ship sound means that, especially at night, sounds with a higher power are heard between 2 and 3 kHz. The 1 kHz band, meanwhile, has lower levels. This is why the NDSI increases and, although sounds at 500 Hz are not considered biophony in the processing (which is the frequency at which vocalisations occur), it also manages to classify them. On the other hand, the event with the lowest rates is event 1, given the high radiation power of the ships in the 1 kHz band. Those recordings where the NDSI is minimal present very concentrated ship sound, below 2 kHz. The rest of the events have disparate behaviours. This index, in this type of recordings, does not seem to be the most appropriate. The spectral overlap of anthropogenic and biological sound is a major problem in reaching a band separation that provides good results. It would be more useful in environments where the presence of biological and non-biological sounds is more differentiated in the spectrum or where there is an absence of masking anthropogenic sound.

Finally, to calculate D (Fig. 3l), the number of samples of the longest recordings has been adjusted to the number of samples of the shortest ones, which last 1 minute in Tabarca. Therefore, the remaining 4 minutes of the El Gorguel recordings would be excluded. This limitation may mean that some of the recordings from this area are left without the event that characterised them. The result obtained in the comparison of the 5 files of the marine reserve with the rest

is very similar, since both the variance and the deviation provide reduced values. The D_t values (Fig. 3m) are the highest and remain practically constant in all the events analysed. Temporally, the recordings show more dissimilarity, which means a greater difference between the two areas analysed. However, considering that 1 is the maximum value, the dissimilarity obtained is low. D_f (Fig. 3n) shows more differences, but smaller values. According to the results, those recordings that show a strong presence of ship traffic, such as event 1 or 3, have an increased dissimilarity, while the rest provides similar and lower values. The D index shows a very small value, which translates into a high similarity. In the theoretical part, talking about the β indices, it was commented that they are still simple indexes and need to be developed. It is proven in practice. The files compared show differences that should be interpreted as dissimilarity. It may be that, as mentioned above, the limited duration of the audios in the first zone may have had a negative influence on the results. However, very noisy events are still reflected, such as the continuous sound of ship mechanics, as opposed to the occasional croaks and clicks that occur in the natural reserve.

4. CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF ACTION

Anthropophonic elements invade the underwater environment with noise, masking natural sounds. In this case, it has been possible to analyse recordings over relatively long periods of time in different seasons. The division of the large amounts of files into generic events has been key to the success of this work. Despite this, the results have not been as accurate as expected.

The indices that analyse the intensity or amplitude of the signal, such as the ACI, are not so far from what is expected, while those that determine heterogeneity, species richness, abundance, etc. generate more diffuse conclusions. Indices such as AR or H are not the most suitable in underwater environments with anthropogenic noise present. The role of indices dedicated to the analysis of the complete soundscape, such as the NDSI, should also be highlighted. It has been shown that marine individuals communicate at frequencies that interfere and overlap with anthropogenic sound, which makes the differentiation between geophony, biophony and anthropophony very complicated.

Moreover, the β indices, although necessary, need to be optimised to complex sound environments. Therefore, apart from contributing new data by carrying out studies with these indices, it is crucial to adapt or develop new indices that consider the acoustic aspects of the water, overcoming the limitations of these initially terrestrial indices. The purpose of this study was to carry out an in-depth analysis of how the soundscape behaves. All the work carried out in a maritime traffic area shows that other types of environments, perhaps less relevant in biodiversity studies, can also serve as a reference for future work.

ACKNOWLEDGEMENTS

This publication is part of the project PCI22022-135081-2, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union "NextGenerationEU"/PRTR", where MCIN stands for the Ministry of Science and Innovation; AEI for the State Research Agency; 10.13039/501100011033 for the DOI (Digital Object Identifier) of the Agency; and PRTR for the acronym of the Plan for Recovery, Transformation and Resilience.

REFERENCES

- [1] B. C. Pijanowski, A. Farina, S. H. Gage, S. L. Dumyahn, and B. L. Krause, "What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science", *Landscape Ecology*, vol. 26, no. 9, pp. 1213-1232, 2011.
- [2] R. M. Schafer, *The New Soundscape: A Handbook for the Modern Music Teacher*, BMI Canada, Canada, 1969.
- [3] N. Pieretti, A. Farina, and D. Morri, "A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI)," *Ecological Indicators*, vol. 11, no. 3, pp. 868-873, 2011.
- [4] E. P. Kasten, S. H. Gage, J. Fox, and W. Joo, "The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology," *Ecological Informatics*, vol. 12, pp. 50-67, 2012.
- [5] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, and S. Duvail, "Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal," *PLOS ONE*, vol. 3, no. 12, pp. 1-9, 2008.
- [6] M. Depraetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, and J. Sueur, "Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland," *Ecological Indicators*, vol. 13, no. 1, pp. 46-54, 2012.
- [7] L. J. Villanueva-Rivera, B. C. Pijanowski, J. Doucette, and B. Pekin, "A primer of acoustic analysis for landscape ecologists," *Landscape Ecology*, vol. 26, no. 9, pp. 1233-1246, 2011.
- [8] J. Sueur, T. Aubin, and C. Simonis, "SEEWAVE, A FREE MODULAR TOOL FOR SOUND ANALYSIS AND SYNTHESIS", *Bioacoustics*, vol. 12, no. 2, pp. 213-226, 2008.
- [9] L. J. Villanueva-Rivera, and B. C. Pijanowski, "soundecology: Soundscape Ecology", <https://CRAN.R-project.org/package=soundecology>, 2018. Last access: 27th August 2023.
- [10] N. Merchant, K. Fristrup, M. Johnson, P. Tyack, M. Witt, P. Blondel, and S. Parks, "PAMGuide", <https://sourceforge.net/projects/pamguide/>, 2015. Last access: 27th August 2023.
- [11] A. Lozano, A. Farina, and R. Márquez, "ACI (Acoustic Complexity Index): a new tool to study anuran calls," *Quehacer Científico en Chiapas*, vol. 9, no. 2, 2014.



DETECCIÓN DE SILBIDOS DE MAMÍFEROS MARINOS EN ESPECTROGRAMAS UTILIZANDO YOLO-V5

Vicent Avaria Avaria¹
Didac Diego-Tortosa²
Sergio Morell-Monzó^{3*}
Carlos-Alberto Quiroz-Rangel³

¹Pixelabs S.L., Salamanca, 6, 28020. Madrid (Madrid), España.

²Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN-LNS), Via S. Sofia 62, Catania, 95123 Italy.

³Universitat Politècnica de València (UPV-IGIC), Paranimf, 1, 46730. Gandia (València), España.

RESUMEN

La monitorización acústica del medio marino es esencial para el seguimiento de especies clave como los mamíferos marinos. Los sistemas de monitorización acústica pasiva contribuyen al estudio de estas especies generando una gran cantidad de datos que deben ser procesados y analizados. Los recientes avances en el campo del aprendizaje profundo permiten automatizar algunas de estas tareas, como la identificación de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas. Sin embargo, entrenar estos modelos desde cero requiere procesar y etiquetar una gran cantidad de datos. En este estudio realizamos un trabajo de aprendizaje por transferencia para el ajuste fino del modelo You-Only-Look-Once (YOLO-v5) que permite la detección de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas. Los resultados demuestran la viabilidad para detectar dichos silbidos con una precisión promedio ($\text{IoU} \geq 0,5$) de 0,70. Se requiere una mayor investigación centrada en la mejora del procesamiento de los datos y del entrenamiento para generar un modelo más preciso y robusto.

ABSTRACT

Acoustic monitoring of the marine environment is essential for tracking key species, such as marine mammals. Passive acoustic monitoring systems contribute to monitoring these species by generating a large amount of data that must be processed and analyzed. Recent advances in the deep learning field make it possible to automate some of these tasks, such as the identification of marine mammal whistles in spectrograms. However, training these models from scratch

requires processing and labeling a large amount of data. In this study, we perform a transfer learning exercise for fine-tuning the You-Only-Look-Once (YOLO-v5) model in detecting marine mammal whistles in spectrograms. The results demonstrate the feasibility to detect such whistles with an AP ($\text{IoU} \geq 0.5$) of 0.70. Further research focused on improving data processing and training is required to generate a more accurate and robust model.

Palabras Clave— aprendizaje profundo, espectrograma, monitorización acústica pasiva, silbidos de mamíferos marinos.

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización acústica del medio marino es un aspecto importante desde el punto de vista científico y medioambiental. El seguimiento de especies clave, como los mamíferos marinos, es esencial para su conservación y para un mayor conocimiento de dichas especies. En este sentido, los sistemas de monitorización acústica pasiva (PAMS, por sus siglas en inglés), cada vez más accesibles, contribuyen al estudio de estas especies generando una gran cantidad de datos que deben ser procesados y analizados. Generalmente, las grabaciones de audio registradas por los PAMS son analizadas de forma manual por biólogos marinos y oceanógrafos expertos a través de espectrogramas. Esta información permite identificar diferentes especies de mamíferos marinos [1], analizar el impacto de las actividades antrópicas sobre las poblaciones [2] y monitorizar la distribución espacial y temporal de las mismas [3].

* **Autor de contacto:** sermomon@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Los recientes avances en el campo del aprendizaje profundo (o *deep learning*) permiten automatizar algunas de estas tareas de identificación de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas [4, 5, 6], e incluso existen algunos trabajos cuyos modelos permiten clasificarlos en base a diferentes criterios [7]. Sin embargo, en la práctica, entrenar estos modelos requiere procesar y etiquetar una gran cantidad de datos, con el alto coste asociado en términos de tiempo y recursos. Además, a menudo es necesario reentrenar estos modelos a la hora de enfrentarlos a otros escenarios (lo que se conoce como cambio de dominio).

Actualmente, los grandes modelos de redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) permiten abordar estos problemas con menor cantidad de datos debido al alto conocimiento adquirido a través del entrenamiento con grandes bases de datos. Un ejemplo de estas CNN es You-Only-Look-Once (YOLO) [8]. YOLO-v5 fue pre-entrenado con cientos de miles de imágenes para la detección de objetos generalistas, con bases de datos como *COCO* o *Imagenet*. Una de las principales ventajas de este modelo es su velocidad de predicción (~60 FPS). En este estudio realizamos un trabajo de ajuste fino (o *fine tuning*) de YOLO-v5 para la detección de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas, generados por un sistema de implementación propia.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Adquisición de datos y generación del espectrograma

En este experimento se analizó una hora y veinte minutos de grabación registrada por un hidrófono estanco ubicado a gran profundidad (~2500 m) en el Mar Mediterráneo. Se trata de un hidrófono omnidireccional con una sensibilidad de recepción, o respuesta de voltaje en recepción (RVR, por sus siglas en inglés) de -165 dB re 1V/μPa en 5kHz. La frecuencia de muestreo es de 65,1 kHz, que permite el estudio de señales comprendidas entre los 5 y 30 kHz, que es la región de interés bioacústico.

Un espectrograma es la representación visual de una señal en su dominio tiempo-frecuencia (figura 1). Esta representación resulta útil para evidenciar la presencia de contenido frecuencial enmascarado en la señal temporal por un ruido más alto en frecuencias fuera del rango de interés. El espectrograma es una representación ampliamente utilizada para el estudio de silbidos de mamíferos marinos.

Se generó el espectrograma de la grabación registrada por el hidrófono utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que discretiza la señal en tiempo en sus componentes de frecuencia. La FFT está condicionada por el número de muestras (nFFT) de la señal utilizada. Para realizar una FFT se necesitan al menos dos ciclos de la señal a exponer [9], lo que limita la frecuencia válida representable (f_{ok}) que dependerá de la frecuencia de muestreo (f_s) de la señal y del nFFT utilizado (ecuación 1).

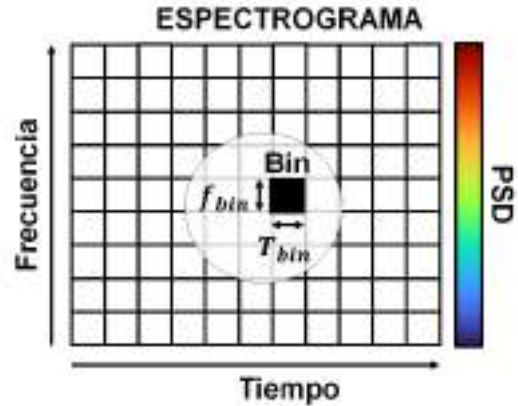


Figura 1. Representación gráfica de un espectrograma.

$$f_{ok} \geq \frac{2 f_s}{nFFT} \quad (1)$$

Es común utilizar números nFFT en base dos para una FFT eficiente, dado que el tiempo de computación se reduce notablemente. Se realiza la FFT en una ventana de tiempo con nFFT muestras y se calcula su contenido frecuencial, este cálculo se realiza en intervalos de tiempo conocidos como *bins*, los cuáles marcarán la resolución temporal (anchura) y frecuencial (altura) del espectrograma (figura 1). La resolución frecuencial y temporal vienen delimitadas por las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

$$f_{bin} = \frac{f_s}{2 nFFT} \quad (2)$$

$$T_{bin} = \frac{nFFT}{f_s} \cdot (1 - overlap) \quad (3)$$

Los valores de cada píxel del espectrograma corresponden a la densidad espectral de potencia (PSD) logarítmica, que tiene unidades de dB re A²/Hz (donde A es la unidad de la amplitud de la señal, en nuestro caso μPa).

Con objeto de poder diferenciar varios tipos de silbidos, se prioriza un equilibrio entre resolución frecuencial-temporal. Para ello se utilizaron 1024 nFFT con un solape (*overlap*) del 50%, lo que supone un f_{bin} de 31,8 Hz y un T_{bin} de unos 7,86 ms. Finalmente, las señales de audio fueron recortadas en porciones de 3,54s para generar los espectrogramas. Este proceso permite generar una matriz (o imagen) cuadrada de 448 x 448 píxeles (*bins*). En la figura 2 se muestra el espectrograma entre 1,97 y 30,39 kHz (f_{ok} se sitúa en 127,15 Hz). Después, se limitó la escala de PSD entre los 20 y 100 dB, para evitar que un ruido mayor altere la escala de grises. Finalmente, los valores de PSD fueron transferidos a un espacio RGB con 256 niveles de gris en cada canal. En total se generaron 2873 imágenes 8-bit con un solape del 50% entre ellas.

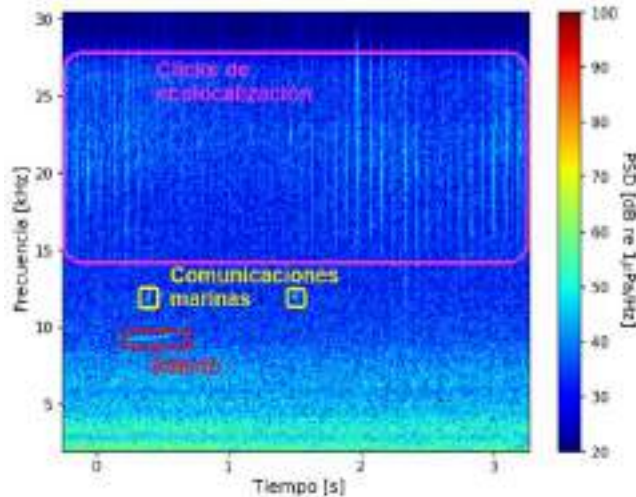


Figura 2. Espectrograma con diferentes sonidos identificados: clicks de ecolocalización, sonidos derivados de comunicaciones marítimas y silbidos emitidos por mamíferos marinos.

2.2. Etiquetado de espectrogramas

El objetivo del etiquetado es proporcionar ejemplos resueltos (*ground truth*) para el reentrenamiento del modelo en la tarea de identificación de silbidos. Este proceso de reentrenamiento para una tarea específica se conoce como *fine tuning*. Las 2873 imágenes generadas fueron etiquetadas manualmente por tres técnicos independientes, previamente entrenados para la identificación de los patrones que definen los silbidos de diferentes mamíferos marinos. En total se pudieron identificar 1586 silbidos en una hora y veinte minutos de grabación, lo que supone una ocurrencia de 19,82 silbidos/minuto. Solamente un tercio de las imágenes contenían al menos un silbido identificable. Las etiquetas fueron almacenadas en formato “*DarkNet*”:

```
<object-class> <x_center> <y_center> <width> <height>
```

Durante el proceso de etiquetado se observó una gran variedad de tipos de silbidos tanto en forma, duración, intensidad y frecuencia. También se identificaron sonidos derivados de comunicaciones marítimas a una frecuencia de 12 kHz de forma periódica y de corta duración como se puede observar en la figura 2. Estos sonidos también fueron etiquetados para el entrenamiento.

2.3. You Only Look Once v5

YOLO-v5 es la primera versión de código abierto desarrollada por la compañía Ultralytics para la detección de objetos en tiempo real [10]. Esta arquitectura de red neuronal convolucional se basa en el trabajo de Redmon y Farhadi (2018) [11]. La arquitectura de la red consta de tres partes principales:

- **Backbone:** La columna vertebral utiliza la estructura *CSP-Darknet53* [12], una modificación de la arquitectura *DarkNet* utilizada en versiones anteriores y que se utiliza como extractor de características.
- **Neck:** Esta parte conecta la columna vertebral y la cabeza. En YOLO-v5, se utilizan estructuras *SPPF* y *CSP-PAN* [12, 13].
- **Head:** Esta parte es responsable de generar la inferencia. YOLO-v5 utiliza el mismo cabezal YOLO-v3 [10].

2.4. Entrenamiento y validación

Con las imágenes completamente etiquetadas se reentrenaron las últimas capas de la red, donde se extraen las características más especializadas y se genera la inferencia. El resto de las capas permanecen congeladas. Este proceso permite especializar el modelo en una tarea concreta, en este caso, la detección de silbidos. En este trabajo, se utilizó la versión YOLO-v5m que corresponde a la arquitectura de tamaño mediano que proporciona un equilibrio entre precisión y tiempo de ejecución. Se utilizó un equipo con 16 GB RAM y una GPU NVIDIA RTX2060 6GB RAM en un entorno Ubuntu 22.04 LTS. Siguiendo las especificaciones de la compañía Ultralytics [11] el entrenamiento se realizó en la plataforma PyTorch 2.0 con CUDA 11 y CudNN 7.5.

El entrenamiento del modelo se realizó utilizando los siguientes hiperparámetros:

- **Array de entrada:** [448, 448, 3] que corresponde al alto y ancho de la imagen y número de canales RGB, respectivamente. Se eligió este tamaño de entrada para evitar deformaciones de la imagen.
- **Tamaño de lote (*batch size*):** 8, limitado por las capacidades de la GPU utilizada.
- **Número de épocas:** 300. El modelo fue entrenado hasta un máximo de 300 épocas, sin embargo, el modelo resultante (*checkpoint*) fue el de aquella época que obtuvo los mejores resultados.
- **Optimizador:** *Stochastic Gradient Descent* (SGD).
- **Ratio de aprendizaje:** 0,01.
- **Otros hiperparámetros:** el resto de hiperparámetros fueron ajustados por defecto.

Durante el entrenamiento del modelo se hace uso de la función de pérdida, proporcionada por el optimizador SGD, para visualizar si el modelo está aprendiendo correctamente.

Para validar el modelo y evaluar su rendimiento se realizó una validación cruzada de 5 iteraciones. En cada iteración se utilizaron el 90% de las imágenes para entrenamiento y el 10% para validación sin reemplazo. Finalmente, se promediaron los resultados obtenidos en todas las iteraciones. Se calcularon las siguientes medidas de exactitud:

- **Precisión:** se define como el número de verdaderos positivos entre la suma de verdaderos positivos y falsos positivos. Consideramos verdaderos positivos aquellas detecciones cuya intersección sobre la unión (IoU, por sus siglas en inglés) es $\geq 0,5$. Esta medida informa sobre la

proporción de silbidos correctamente detectados respecto a las detecciones del modelo.

- **Recall (recuperación):** se define como el número de verdaderos positivos entre la suma de verdaderos positivos y falsos negativos. Se consideran verdaderos positivos aquellas detecciones cuya IoU es $\geq 0,5$. Esta medida informa sobre la proporción de silbidos correctamente detectados del total de silbidos presentes.
- **F1-score:** corresponde a la media armónica entre precisión y recall.
- **mAP y AP_i:** la mAP se define como el promedio de área bajo la curva precisión-recall para todas las clases, mientras que el AP_i es el área bajo la curva precisión-recall de la clase *i*.

2.5. Experimentos

Se plantearon dos escenarios de detección. El primero de ellos (escenario 1) se centró en identificar únicamente los silbidos (*whistle*) procedentes de mamíferos marinos. Para ello, se utilizaron únicamente las etiquetas correspondientes a silbidos para entrenar el modelo. El segundo (escenario 2) se centró en detectar tanto los silbidos (*whistle*) como los sonidos derivados de comunicaciones marinas (*noise*). Para ello, se utilizaron tanto las etiquetas correspondientes a silbidos como las etiquetas correspondientes a sonidos de comunicaciones marinas para entrenar el modelo. Este segundo escenario se planteó con objeto ayudar al modelo a detectar mejor los silbidos sin confusión con los sonidos derivados de comunicaciones marinas.

3. RESULTADOS

3.2. Escenario 1: whistle

En este escenario se entrenó el modelo hasta un máximo de 300 épocas. La época con mejores resultados fue la 185. La tabla 1 muestra los resultados del modelo en el escenario 1 en la fase de validación. Según estos resultados el modelo es capaz de detectar los silbidos con una mAP (IoU $\geq 0,5$) del 65%.

Tabla 1. Resultados de la validación del modelo en el escenario 1.

Precisión	0,63
Recall	0,72
F1-score	0,67
mAP (IoU $\geq 0,5$)	0,65

En la figura 3 se muestra la curva precisión-recall y el F1-score a diferentes niveles de confianza. Se obtiene el valor máximo de F1-score a una confianza de 0,29.

3.2. Escenario 2: whistle + noise

En este escenario se entrenó el modelo hasta un máximo de 300 épocas. La época con mejores resultados fue la 248. La tabla 2 muestra los resultados del modelo en el escenario 2 en la fase de validación. Según estos resultados el modelo es capaz de detectar los silbidos con una mAP (IoU $\geq 0,5$) del 76%.

Tabla 2. Resultados de la validación del modelo en el escenario 2.

Precisión	0,77
Recall	0,75
F1-score	0,76
mAP (IoU $\geq 0,5$)	0,76

En la figura 4 se muestra la curva precisión-recall y el F1-score a diferentes niveles de confianza. Se obtiene un valor máximo de F1-score a una confianza de 0,42.

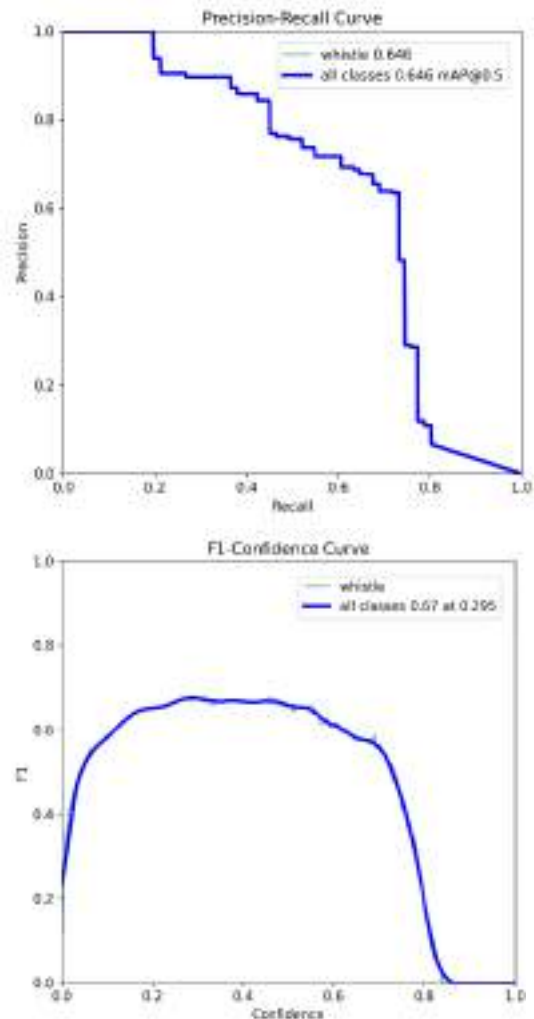


Figura 3. Curva precisión-recall y F1-score a diferentes niveles de confianza en el escenario 1.

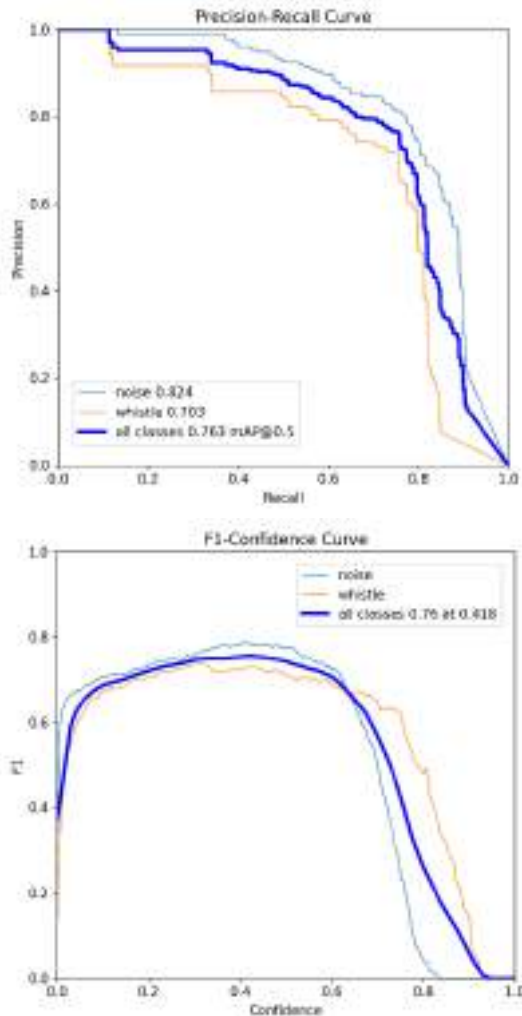


Figura 4. Curva precisión-recall y F1-score a diferentes niveles de confianza en el escenario 2.

Si analizamos el AP ($\text{IoU} \geq 0,5$) de cada clase por separado observamos que el AP de la clase *noise* que corresponde a los sonidos derivados de comunicaciones marinas es de 0,82 mientras que el de la clase *whistle* que corresponde a los silbidos es de 0,70.

3. DISCUSIÓN

Este trabajo permitió entrenar un modelo YOLO-v5m para la detección de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas. En base al mejor de los dos escenarios de detección planteados se obtuvo un mAP ($\text{IoU} \geq 0,5$) de 0,76 con un AP ($\text{IoU} \geq 0,5$) de 0,70 para la detección de silbidos. Añadir las etiquetas de otros sonidos que puedan generar confusión mejoró la detección de silbidos con un incremento de AP ($\text{IoU} \geq 0,5$) de 0,65 a 0,70. Por tanto, esta es una buena recomendación para que el modelo sea capaz de discernir entre ambas categorías.

El uso de un modelo preentrenado como YOLO-v5 presenta una ventaja con respecto a otros trabajos donde se entrenaron modelos desde cero por su menor requerimiento de datos. Además, el enfoque basado en detección de objetos es especialmente conveniente de cara a la cuantificación y caracterización de silbidos con respecto a otros enfoques como la clasificación de imágenes. Por otro lado, es posible que existan limitaciones para elevar la exactitud de YOLO-v5, incluso usando una mayor cantidad de datos y mejores cadenas de procesamiento, debido a que este fue entrenado con imágenes de objetos generalistas.

En base a la interpretación visual de las detecciones del modelo (ver figura 5) y la experiencia adquirida durante el proceso de etiquetado observamos que a menudo es difícil definir los límites de un silbido. Además, frecuentemente los silbidos están divididos en dos o más partes. Estas características provocan que una cantidad considerable de detecciones no sean consideradas verdaderos positivos debido a que no superan el umbral de $\text{IoU} \geq 0,5$, a pesar de que el modelo fue capaz de identificar el silbido. En este sentido, incluso cuando los tres técnicos trataron de etiquetar las mismas muestras, el solape entre sus cuadros delimitadores fue relativamente bajo. Por este motivo, esta validación podría estar subestimando el rendimiento del modelo. De hecho, el modelo fue capaz de identificar silbidos en más del 80% de las imágenes que contenían uno o más silbidos. Una validación más exhaustiva debería calcular el rendimiento del modelo a diferentes umbrales IoU y compararlo con la capacidad de detección de un etiquetador humano.

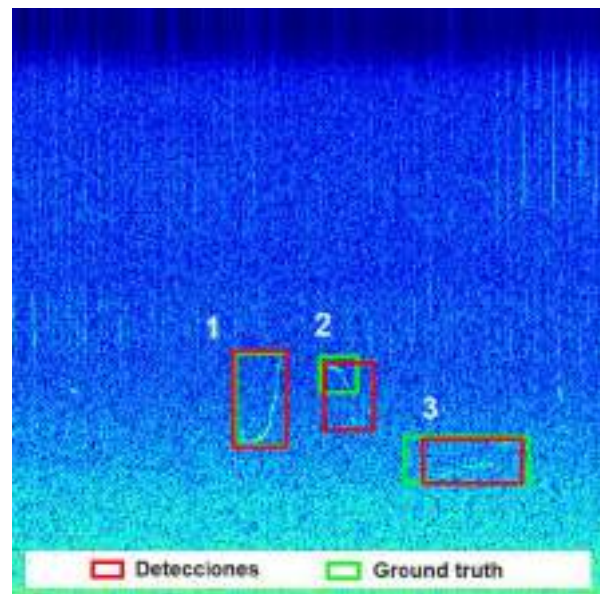


Figura 5. Ejemplo de detecciones del modelo en la imagen 301 del conjunto de datos de validación. El silbido 2 fue detectado, pero no se consideró verdadero positivo por no tener una $\text{IoU} \geq 0,5$.

Una herramienta que incorpore este modelo podría ahorrar tiempo y costes a la hora de caracterizar y etiquetar grandes cantidades de datos. Esta herramienta podría agilizar la creación de muestras para entrenar nuevos modelos de detección y clasificación de silbidos de mamíferos marinos. En este sentido, es necesario realizar una validación más exhaustiva y definir diferentes umbrales IoU aceptables. También es necesario validar el modelo con un conjunto de datos de *test*, así como ponerlo a prueba en diferentes escenarios, como grabaciones de otros hidrófonos, en otras zonas geográficas y otros periodos de tiempo.

Por otra parte, se sabe que la relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés) afecta a la capacidad de reconocer visualmente los silbidos en espectrogramas. Por tanto, es asumible que una reducción de la SNR afectará a la capacidad de detección del modelo. Futura investigación debería tratar de cuantificar la sensibilidad del modelo al ruido para definir unos límites de operabilidad.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra la viabilidad de entrenar un modelo YOLO-v5 para la detección de silbidos de mamíferos marinos en espectrogramas. So obtuvo un mAP (IoU ≥ 0.5) de 0.76 y un AP (IoU ≥ 0.5) para la detección de silbidos de 0.70. Entrenar el modelo también con etiquetas de otros sonidos que pueden confundirse con los silbidos permitió al modelo distinguir ambas categorías y mejorar la detección de silbidos.

Los resultados obtenidos son prometedores y justifican una mayor investigación en este campo. Es necesario realizar una validación más exhaustiva, así como mejorar el procesamiento de datos y el entrenamiento del modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación y recursos proporcionados por el proyecto *Nostrum, Telescopios de neutrinos para la física fundamental y astronomía multi-mensajero* en la Universitat Politècnica de València (UPV): PID2021-124591NB-C42 a través de la Agencia Estatal de Investigación. Igualmente, los autores agradecen el apoyo de los doctores Víctor Espinosa Roselló y Miguel Ardid Ramírez del Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras – IGIC, de la UPV.

6. REFERENCIAS

[1] Janik, V. M., King, S. L., Sayigh, L. S., & Wells, R. S. (2012). Identifying signature whistles from recordings of groups of unrestrained bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). *Marine Mammal Science*, vol. 29-1, pp. 109–122. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2011.00549.x>

[2] Lara, G., Bou-Cabo, M., Llorens, S., Miralles, R., & Espinosa, V. (2023). Acoustical Behavior of Delphinid Whistles in the

Presence of an Underwater Explosion Event in the Mediterranean Coastal Waters of Spain. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11-4, p. 780. <https://doi.org/10.3390/jmse11040780>

[3] Silva, T., Mooney, T., Sayigh, L., & Baumgartner, M. (2019). Temporal and spatial distributions of delphinid species in Massachusetts Bay (USA) using passive acoustics from ocean gliders. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 631, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3354/meps13180>

[4] Duan, D., Lü, L., Jiang, Y., Liu, Z., Yang, C., Guo, J., & Wang, X. (2022). Real-time identification of marine mammal calls based on convolutional neural networks. *Applied Acoustics*, vol. 192, p. 108755. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108755>

[5] Li, P., Liu, X., Palmer, K. J., Fleishman, E., Gillespie, D., Nosal, E.-M., Shiu, Y., Klinck, H., Cholewiak, D., Helble, T., & Roch, M. A. (2020). Learning Deep Models from Synthetic Data for Extracting Dolphin Whistle Contours. *IEEE 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. <https://doi.org/10.1109/ijcnn48605.2020.9206992>

[6] Nur Korkmaz, B., Diamant, R., Danino, G., & Testolin, A. (2023). Automated detection of dolphin whistles with convolutional networks and transfer learning. *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fraci.2023.1099022>

[7] Jiang, J., Bu, L., Duan, F., Wang, X., Liu, W., Sun, Z., & Li, C. (2019). Whistle detection and classification for whales based on convolutional neural networks. *Applied Acoustics*, vol. 150, pp. 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.007>

[8] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2015). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection (Version 5). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1506.02640>

[9] G.F. Lara Martínez, Caracterización y modelado de la producción de sonidos de las ballenas beluga (*Delphinapterus leucas*) basado en modelos de análisis/síntesis de voz, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València (UPV), Oct, 2016. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/74645>

[10] Ultralytics. YOLOv5. Github repository: <https://github.com/ultralytics/yolov5>

[11] Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement (Version 1). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1804.02767>

[12] Wang, C.-Y., Liao, H.-Y. M., Yeh, I.-H., Wu, Y.-H., Chen, P.-Y., & Hsieh, J.-W. (2019). CSPNet: A New Backbone that can Enhance Learning Capability of CNN (Version 1). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1911.11929>

[13] Jani, M., Fayyad, J., Al-Younes, Y., & Najjaran, H. (2023). Model Compression Methods for YOLOv5: A Review (Version 1). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2307.11904>



ENCLOSURE ACOUSTICS CONSIDERATIONS FOR THE STUDY OF THE EFFECT OF NOISE ON FISH

J. Carbajo^{1*}
*P. Poveda*¹
*I. Pérez Arjona*²
*V. Espinosa*²
*M. Cianferra*³
*U. Tinivella*⁴
*M. Mauro*⁵
*L.M. Godinho*⁶
*J. Ramis*¹

¹University of Alicante (Spain)

²Valencia Polytechnic University, Gandía Campus (Spain)

³University of Trieste (Italy)

⁴National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (Italy)

⁵Università degli Studi di Palermo

⁶University of Coimbra (Portugal)

* *Autor de contacto:* jramis@ua.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

RESUMEN

El estudio del comportamiento de los peces resulta extremadamente complicado en un entorno de libertad, especialmente si hablamos de su exposición a diferentes fuentes sonoras. Por este motivo, de las investigaciones en marcha son llevadas a cabo en el seno de un laboratorio, bien en peceras o bien en tanques, teniendo así un entorno controlado donde monitorizar continuamente el comportamiento de las muestras. Sin embargo, un recinto confinado difiere considerablemente de un espacio abierto. Mientras que un pez en libertad estará sometido por norma general a un campo sonoro libre, cuando hablamos de un recinto cerrado las condiciones cambian notablemente.

ABSTRACT

Studying the behaviour of fish is extremely difficult in a free environment, especially when it comes to their exposure to different sound sources. For this reason, existing research is carried out in a laboratory, either in fish tanks or in tanks, thus having a controlled environment in which the behaviour of the samples can be continuously monitored. However, a confined enclosure differs considerably from an open space. While a fish in the wild will generally be subjected to a free sound field, when we talk about an enclosed area the conditions change markedly.

Palabras Clave— Effect of noise on fish, tanks, experimental setup, numerical methods.

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

Studying the behaviour of fish is extremely difficult in a free-ranging environment, especially when it comes to their exposure to different sound sources. This is one of the reasons why a lot of research is carried out in a laboratory, either in fish tanks or in tanks, thus having a controlled environment where the behaviour of the samples can be continuously monitored. However, a confined space differs considerably from an open space. While a fish in the wild will generally be subjected to a quasi-free sound field, in a confined enclosure the conditions change significantly. The characteristics of the enclosure will significantly influence the test results, so it seems necessary to establish an optimal configuration that approximates the generated sound field to the free conditions of the fish, especially considering the ability of the fish to determine the direction from which the sound is coming.

This paper describes the process being carried out in this regard to adjust vibroacoustic models of tanks used for feeding and fattening fish in aquaculture and in research work on the effect of noise on fish [1]. Concerning the shape and dimensions of these tanks vary (figure 1), many of them are cylindrical, others have a shape close to that of a parallelepiped. We can also find large installations [2]. Almost all of them have interior walls with low absorption.



Figure 1. <https://www.acuitem.es/es/acuicultura/categoria/31-tanques-y-depositos>. Visited 15/09/2023

2. BACKGROUND

The space and time distribution of the sound pressure it is usually referred to as “Sound Field”.

Since the sound field varies from one spatial position to another, the location and even the orientation of the microphone has a distinct influence on the result. Sometimes the sensor, the instrument, and its accessories, as well as the very presence of the operator, can alter significantly the signal to be measured.

For this reason, it is important to clarify a few concepts. Although the complexity of any real-life sound field is very high in almost all cases, from a metrological point of view it may frequently approximated by one of four limiting cases with well-defined properties:

- Free Field
- Diffuse Field
- Pressure Field
- Stationary Field

A free field is any sound field whose propagation direction is clearly determined.

A condition for the presence of a free field is that there are no reflecting surfaces near the sound source or the receiver. Special cases of free field are plane, cylindrical, or spherical waves, but at a considerable distance from the source any free field exhibits an approximately plane behaviour. In general, free field takes place outdoors, but it is also found inside an anechoic chamber, i.e., a room with all its surfaces covered by highly absorbent materials or structures so that the reflected sound is negligible.

A diffuse field, also known as random field, is any sound field such that all propagation directions are equally probable. In general, we have a diffuse field in large, closed rooms whose dimensions are large compared to the wavelength range of interest, particularly those with irregular shape or that contain a variety of sound reflective objects. In general, a diffuse field also has a continuous spectrum.

A pressure field is any sound field that oscillates in phase and with the same amplitude at every location of a given

spatial region. In general, this condition takes place in small enclosures where the maximum linear dimension is much smaller than the minimum wavelength of interest. In order not to surpass an amplitude variation of 1 % within the enclosure (which is equivalent to a difference of 0.1 dB, i.e., the resolution of most sound level meters), it is sufficient that its maximum dimension be about $\lambda/40$. A typical situation is within an acoustic coupler, for instance, an acoustic calibrator where a sound source and the microphone under test share a small and closed volume. Another case is that of an artificial ear for earphone testing. A stationary field is any sound field that oscillates in phase or opposite phase in all locations of a region. It happens only for sinusoidal tones in small enclosures, even if the conditions for a pressure field do not hold. An example is the Kundt tube or impedance tube used to measure the normal-incidence sound absorption coefficient.

As is known, there are three basic theories for the study of the sound field in an enclosure: statistical, geometrical and wave theory [4]. Any theory (or model based on a theory) must provide an answer to two phenomena that differentiate free-field propagation from that of a confined enclosure: a) the increase in perceived sound level and b) the persistence of sound once the sound source is disconnected (which we usually call reverberation and for which the parameter of reverberation time is usually used to be quantified).

In this case, given the dimensions of the enclosures used and the frequencies (or wavelengths) of the test sounds, a study from the wave point of view is necessary and, given that the shapes of the contours are irregular, it is necessary to resort to numerical methods. For the study carried out, the FEM method [5,6] and the commercial software ANSYS [7] have been used. A model has also been developed using the Boundary Element Method (Matlab).



Figure 1. Image of the tank used as a reference for numerical models.

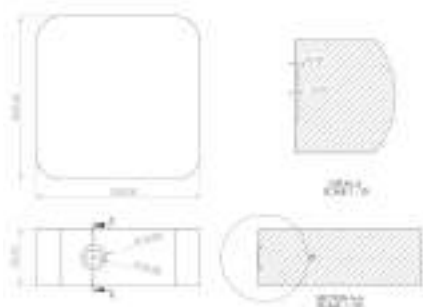


Figure 2. Dimensions of the tank shown in figure 1. It is a 2x2 m high, 0.7 m high enclosure with a sound source embedded in one of its walls.



Figure 3. Image from [3] showing the sound source deposited on the ground.

3. PROCEDURE

As discussed above, the test setup for determining the influence of noise on fish is extremely critical. As a confined space, the occurrence of a reverberant field and the effect of enclosure modes can lead to highly heterogeneous sound pressure level distributions that compromise the results of the experiments and increase their uncertainty. Therefore, it is essential to analyze the acoustic behavior of the enclosure used in the tests. The first step is to implement numerical models to predict the behavior of these enclosures. We are interested in two variables associated with the acoustic field: a) the sound pressure (or sound pressure level) and b) the particle motion (PM), in any of its expressions: displacement, velocity or acceleration [8].

In our process we have contemplated two different geometries: a) Close to the parallelepiped (figure 1) with the dimensions shown in figure 2. This tank has already been used in published works [3]; and (b) cylindrical, 12 meters in diameter and 9 meters deep. The systematics would be the same for any other enclosure.

The general characteristics of implemented models are given:

a) FEM

The model implemented in FEM, consisting of a total of 200769 elements, has a single domain corresponding to the water inside the tank. The excitation was simulated by incorporating a given vibration on the surface corresponding to the radiating plate of the loudspeaker assuming that the piston model is verified. The meshed model is shown in figure 4.

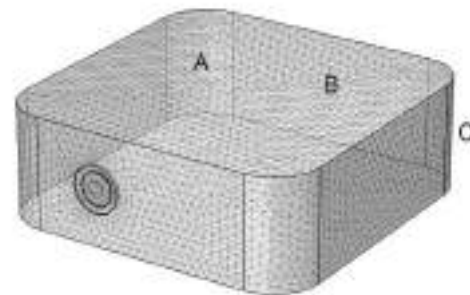


Figure 4. Finite element representation of the tank model. A, B and C are the three surfaces whose absorption is to be changed.

b) BEM

The Boundary Element Method is used to model the problem in the frequency domain, using a 3D approach. For that purpose, the circular tank is discretized using triangular elements, with constant shape functions. In the discretization process, and to ensure adequate accuracy, the element size is defined so that it is always less than 1/8th of the wavelength of interest.

Given the physical characteristics of the system, the boundary conditions to be considered consist of null particle velocity at the bottom and at the rigid walls of the tank, and null pressure on the free surface. The system is excited by a surface load, located in a small circular region at the surface, for which unit velocity is imposed. To allow for a more efficient analysis, and given the geometry of the problem, the floor of the tank is simulated using the image source method, directly accounting for the required boundary conditions. Additionally, and to reduce the discretization requirements (and consequently the computational cost), symmetry is also considered, thus modelling only half of the system.

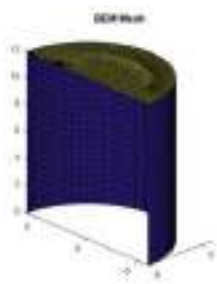


Figure 5. Mesh model implemented in BEM for the frequency of 800 Hz.

4. RESULTS

3.1. FEM Model. Results

The first step is to obtain the modal basis. Figure 5 shows four of the modal shapes of the enclosure under study. They are, of course, reminiscent of those of a perfect parallelepiped.

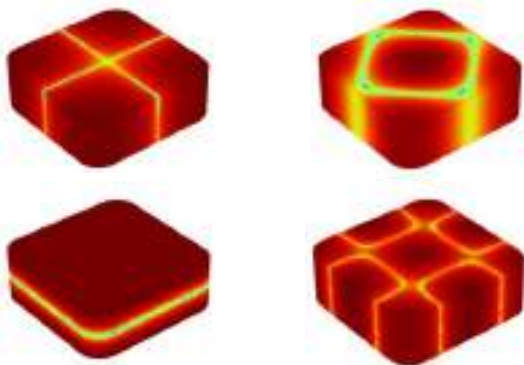


Figure 5. Four modal forms of the enclosure under study.

To visualise the effect of the position of the sound source, figure 6 shows the sound pressure level in a plane parallel to the ground for three different positions of the sound source (always modelled as a piston whose points vibrate with a constant velocity). It can be seen immediately that there are large differences. The velocity of the particle at each of the positions is also shown (arrows).

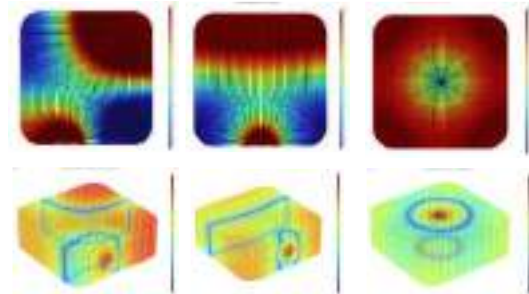


Figure 6. Sound pressure level and particle velocity distribution for 500 Hz frequency for three source positions.

The acoustic behaviour of the tank in terms of absorption of the walls is analysed by comparing the consequences of two different conditioning methods. The first one, considering all reflective surfaces (zero absorption coefficient). The other two, by modifying the absorption of the enclosures in front of the loudspeaker (A, B and C in figure 4).).

Figure 7 shows the results obtained. As is evident, the modification of the absorbent characteristics of certain walls of the enclosure has a significant effect on both the sound field and speed. All cases were analyzed for the frequencies of 120, 500 and 1000 Hz.

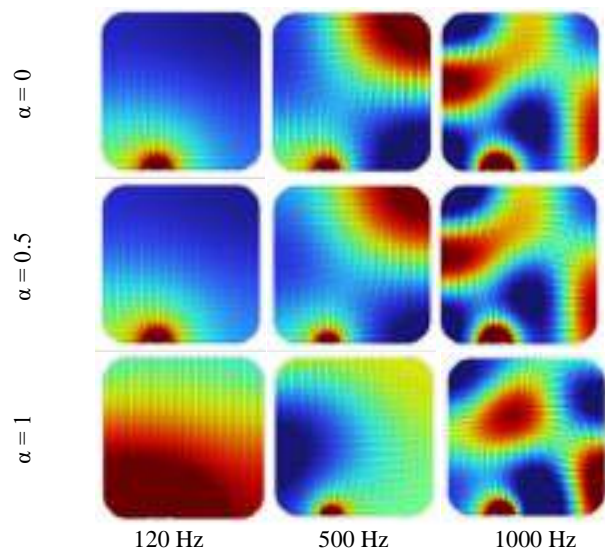


Figure 7. Sound field (sound pressure and velocities) inside the tank considering different absorption coefficients. Analysis for 100, 500 and 1000 Hz.

1.2. BEM

From data of the geometry of the enclosure and the location of the source, the model allows us to obtain the distribution of the sound pressure level, the velocity of the particle on the y-axis and on the z-axis. Figures 8, 9 10 show the results for the frequency of 800 Hz when the source is in the center of the upper surface (air-water boundary)

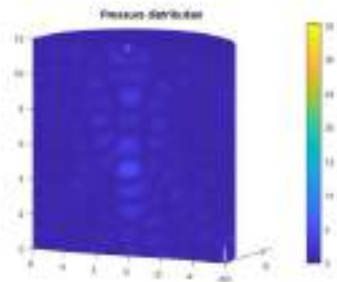


Figure 8. Distribution of sound pressure in the tank of 12 meters deep and 6 meters radius when the source is in the center of the upper surface (air-water boundary).

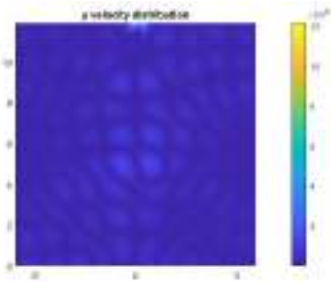


Figure 9. Particle velocity distribution on the y-axis when the source is at the centre of the upper surface (air-water boundary).

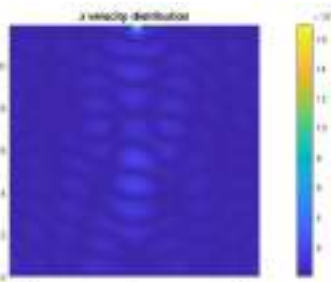


Figure 10. Particle velocity distribution on the z-axis when the source is at the centre of the upper surface (air-water boundary).

4. CONCLUSIONS

The results show that, as expected, depending on frequency, source position and wall absorption, highly heterogeneous sound pressure level and particle velocity distributions can be found.

It is concluded that it is necessary for the experimental setup to consider the control of the acoustic field inside the tank to reduce the uncertainty in the experimental results.

To complete the vibro-acoustic study, it will be necessary to characterise the material of the tank walls, determining their mechanical characteristics (including loss factor). It will also be necessary to carry out an experimental modal analysis to quantify the contribution of the vibrating walls to the internal sound field. Once these measurements have been made, it will be possible to adjust a fluid structure model to control the acoustic field inside the tank and, therefore, more precise information on the significant variables to assess the effect of noise on fish.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was financed by the European Union Next Generation EU and FEDER funds under the projects PCI2022-135081-2 and PID2021-127426OB-C22 of the Ministry of Science and Innovation of Spain, respectively.

REFERENCES

- [1] <https://www.acuitem.es/es/acuicultura/categoria/31-tanques-y-depositos>. Visited 15/09/2023
- [2] http://www.ieo.es:8080/es_ES/web/murcia/plantas-de-cultivo Visited 10/09/2023.
- [3] Cremer, L; Muller, H.A, Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science, Londres, 1982.
- [4] Mauro M, Pérez-Arjona I, Perez EJB, Ceraulo M, Bou-Cabo M, Benson T, Espinosa V, Beltrame F, Mazzola S, Vazzana M, Buscaino G. The effect of low frequency noise on the behavior of juvenile *Sparus aurata*. *J Acoust Soc Am*. 2020 Jun;147(6):3795. doi:10.1121/10.0001255. PMID: 32611157.
- [5] Popper, A. N. and Hawkins, A. D. The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *J. Acoust. Soc. Am*. 143 (1). 2018.
- [6] O. C. Zienkiewicz, El método de los elementos finitos, Ed. Reverté, (1982)
- [7] ANSYS theory reference 8.1, ANSYS Inc, (2003).
- [8] Ansys® Academic Research Mechanical, Release 2023 R1.01.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

ASL-0 Acústica de salas.

LA SEMANA DE MÚSICA RELIGIOSA DE CUENCA (1962-2023): LA IMPORTANCIA DE LA ACÚSTICA Y LOS ESPACIOS

Marco Antonio de la Ossa Martínez^{1*}

¹Universidad de Castilla-La Mancha/UNIR

RESUMEN

Surgida en 1962, la Semana de Música Religiosa de Cuenca (SMR) es el cuarto festival más antiguo de España. Declarado de Interés Turístico Internacional, es uno de los ciclos más prestigiosos de cuantos se dedican en España y a nivel internacional a la música académica religiosa.

Esta propuesta se centrará en concreto en analizar los 54 espacios que se han utilizado en la Semana en las sesenta ediciones que se han realizado hasta la fecha para albergar conciertos y otros eventos. Así, tras efectuar una breve aproximación a su génesis y directores, se agruparán por funciones, se atenderá a su ubicación geográfica y se pondrá el foco en cuáles han sido empleadas en un mayor número de años.

ABSTRACT

Born in 1962, the Cuenca Religious Music Week (SMR) is the fourth oldest festival in Spain. Declared of International Tourist Interest, it is one of the most prestigious cycles of those dedicated in Spain and internationally to religious academic music.

This proposal will focus specifically on the 55 venues that have been used in the Week in the sixty editions that have been held to date to host concerts and other events. Thus, after a brief approach to their genesis and directors, they will be grouped by function, their geographic location will be considered and those that have been used in a greater number of editions will be analyzed.

Palabras Clave— Semana de Música Religiosa de Cuenca, festivales, música, acústica.

1. INTRODUCCIÓN: OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo principal de la esta investigación es analizar los espacios que se han utilizado para albergar conciertos y otras actividades en la Semana de Música Religiosa de Cuenca entre 1962, año en el que surgió el festival, hasta 2023, fecha

en la que se celebró su 60^o edición (las de 2020 y 2021 se cancelaron por la pandemia).

La metodología que basa este trabajo es fundamentalmente analítica, cuantitativa y descriptiva. En primer lugar, se ha realizado una búsqueda, vaciado y análisis de todos los programas editados por el ciclo en los distintos años. En este sentido y debido a que la SMR no posee un archivo, se ha atendido a las fuentes disponibles en el Archivo de la Diputación de Cuenca. También se han empleado otros materiales recopilados por el autor.

Además, se ha partido del estudio de buena parte de la literatura existente en torno al festival. En consecuencia, se han manejado distintos artículos divulgativos, artículos publicados en revistas indexadas, capítulos de libros y monografías que han atendido, de una u otra manera, a los espacios y ubicaciones de la Semana.



Figura 1. Fotografía del concierto de la Orquesta y Coro Gubelkian en la antigua iglesia de san Pablo en la Semana de Música Religiosa de 1974 [1]

2. BREVE ACERCAMIENTO A LA HISTORIA DE LA SEMANA DE MÚSICA RELIGIOSA DE CUENCA

* **Autor de contacto:** marcoantiodela@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Nacida en plena dictadura franquista en una ciudad que poseía cerca de 30.000 habitantes, la SMR se ha ido convirtiendo en un referente en cuanto a convivencia, disfrute, interpretación y estudio de la música académica occidental religiosa.

Antonio Iglesias fue el ideólogo y fundador del ciclo. En 1961 acudió a Cuenca para charlar con el presidente de la Diputación de esta provincia, Eugenio López y López, además antiguo compañero suyo de instituto en la ciudad de la que provenían ambos, Ourense. El motivo principal del desplazamiento era responder en persona de forma negativa a la rogativa que el segundo había realizado al gobierno central franquista para ubicar en un conservatorio de música o un auditorio con los que dinamizar su escaso movimiento cultural y educativo [2].



Figura 2. Fotografía de Antonio Iglesias en Cuenca en 1971 [3]

Durante el paseo que ambos realizaron por su Casco Antiguo, se toparon con las obras de restauración que se estaban desarrollando en la antigua iglesia de san Miguel. Iglesias había reflexionado tiempo atrás en la necesidad de crear un festival musical sobre música religiosa, ya que era un género que, bajo su juicio, requería un nuevo impulso en España. Tras departir sobre la idea, ambos estuvieron de acuerdo en que este nuevo ciclo se ubicara e iniciara en Cuenca.

Las instituciones aprobaron la propuesta y consideraron que la iglesia de san Miguel sería el espacio en el que se debían ubicar los primeros conciertos. En consecuencia, el proyecto original de restauración que dirigía el arquitecto e historiador Fernando Chueca tuvo que variar para adaptarse a esta nueva función y objetivos [4].

Desde ese momento y debido a la gran tradición e importancia que poseían las celebraciones de la Semana Santa en Cuenca, se escogió esa fecha como adecuada para su desarrollo, aunque en algunas ocasiones se adelantó siete días en el calendario.

En todo este tiempo, en la Semana se han mantenido de una manera u otra algunas características que la definen y caracterizan: su especialización musical es una de las fundamentales, ya que la música religiosa, aunque se entiende de una manera muy amplia, es la base de la mayor parte de actividades y conciertos.

También son muy relevantes en la SMR el apoyo a la creación de nueva música (en todas las ediciones se ha encargado y ejecutado composiciones de estreno), el fomento

de la investigación musicológica, la conmemoración de los aniversarios de nacimiento y fallecimiento de algunos compositores y la reunión de directores, solistas y agrupaciones vocales e instrumentales de reconocido prestigio a nivel nacional e internacional.

De forma breve, también se puede aludir al concepto de música religiosa que se maneja, ya que se entiende de una manera muy abierta. Ha ido adaptándose al paso del tiempo y a la idea que, sobre ella, han manejado y planteado los diferentes directores artísticos que han conducido el festival.



Figura 3. Fotografía de un concierto de la Orquesta de Cámara de Madrid en la antigua Iglesia de san Miguel en la SMR de 1965 [5]

La música creada en torno al cristianismo en el ámbito católico, ortodoxo y protestante, sobre todo en el primer y tercer caso, ha sido preponderante, aunque también se ha brindado espacio a propuestas vinculadas con otros credos, como el budismo o el islamismo. En buena parte, el repertorio se vincula a la música litúrgica de manera directa, aunque también se ha atendido a acepciones espirituales, meditativas o místicas, y se ha acercado a muy diversas expectativas, inquietudes y postulados.

En lo referente a las personas que han dirigido a la Semana de Música Religiosa de Cuenca entre 1962 y 2023, su primer conductor y director, Antonio Iglesias, estuvo al frente del festival en veinte ediciones, entre 1962 y 1981. Le siguió en el cargo Pablo López de Osaba, que hizo lo propio en doce ocasiones entre 1982 y 1993. Pilar Tomás se mantuvo en el cargo diez años (2007-2016), el dúo que integraron Ismael Martínez Barambio & Ignacio Yepes siete (1994-2000) y Antonio Moral seis (2001-2006).

Cristóbal Soler fue director artístico en cinco ediciones entre 2017 y 2021, aunque, como se ha mencionado, las dos últimas se suspendieron debido a la COVID-19. Por último, Daniel Broncano se mantuvo en el cargo en 2022 y Andoni Sierra ha conducido la propuesta de 2023.

Tabla 1. Directores artísticos de la Semana de Música Religiosa y periodo de tiempo en el que ocuparon el cargo

Director	Periodo
A. Iglesias	1962-1981
Pablo López	1982-1993
Martínez & Yepes	1994-2000
A. Moral	2001-2006
Pilar Tomás	2007-2016
C. Soler	2017-2021
D. Broncano	2022
A. Sierra	2023

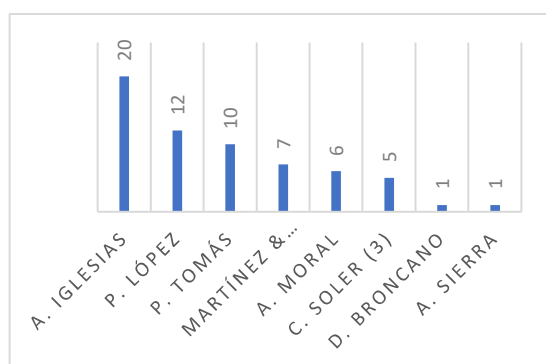


Figura 4. Número de años en los que cada director artístico estuvo al frente de la Semana de Música Religiosa de Cuenca

3. ESPACIOS ELEGIDOS PARA ALBERGAR ACTIVIDADES EN LA SEMANA DE MÚSICA RELIGIOSA DE CUENCA (1962-2023)

Los espacios en los que han tenido lugar los conciertos y el resto de las actividades que han compuesto el programa de las distintas ediciones de la Semana de Música Religiosa de Cuenca han sido muy variados y diversos. De esta forma, han acogido recitales, conferencias, clases magistrales, charlas, exposiciones, jornadas, proyecciones, rutas, talleres, visitas y otras muchas actividades adecuadas a su acústica, posibilidades y dimensiones. En buena parte, han destacado por su adecuación y belleza. En este sentido, no hay que olvidar que Cuenca es una ciudad declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO desde 1996.



Figura 5. Fotografía de Santiago Torralba de un concierto de Tasto Solo en la Catedral de Cuenca en la SMR

De manera lógica, han ido parejas a las ideas, propuestas, inquietudes y gustos de cada director artístico en las diferentes etapas. La gran mayoría de los conciertos se han desarrollado sin amplificación, por lo que, para cada uno de los eventos, se debe tener en cuenta la adecuación de cada uno de los espacios al solista o agrupación musical que protagonizará el recital, el programa musical que se interpretará y la situación del público en el mismo.

En total, se han empleado un total de 54 espacios diferentes en la Semana de Música Religiosa de Cuenca entre 1962 y 2023. Dieciocho de ellos son iglesias² (Asunción de Alarcón, Asunción de Tarancón, Asunción de Nuestra Señora de Cardenete, Asunción de Valdepeñas, la Luz, Natividad de Carrascosa del Campo, Parroquial de Valeria, Parroquial de Villar de Cañas, Salvador, san Felipe Neri, san Julián, san Pedro, san Román, Santa Cruz, Santa María de Alarcón, Santiago Apóstol de San Clemente, Valdecabras y Villaconejos del Trabaque), ocho son museos (Ars Natura, Espacio Torner, Fundación Antonio Pérez, Fundación Antonio Saura, Museo de Arte Abstracto Español, Museo de las Ciencias, Museo Diocesano y Museo Casa Palacio) y otros tantos espacios culturales y educativos (Aula Cultural Universidad Abierta, Casa de la Cultura, Conservatorio Profesional de Música de Cuenca “Pedro Aranaz”, Edificio Colmillo de la UCLM, Escuela de Artes Cruz Novillo, Paraninfo de la UCLM en Cuenca, salón de actos de Diputación de Cuenca y la sede de la UIMP de Cuenca).

² Se añadirá la localidad de ubicación si es diferente de Cuenca capital.



Figura 6. Imagen de un concierto en la Iglesia Románica de Arcas [1]

También han acogido propuestas en la SMR cuatro antiguas iglesias (Merced, san Juan Bautista de Alarcón, Padres Paúles y san Miguel), tres monasterios (Concepción Francisca, Tejada y Uclés) y otros tantos teatros y auditorios (Auditorio de Tarancón, Teatro Auditorio de Cuenca y Teatro Palenque de Talavera de la Reina).

Además, en este listado se cuentan dos catedrales (Cuenca y Ciudad Real), dos conventos (Religiosas Justinianas de San Pedro y Santa Catalina de Talavera), una basílica (Nuestra Señora de la Asunción de Villanueva de la Jara), una colegiata (Belmonte), un hotel (Parador de Cuenca, antiguo Convento de san Pablo), un hospital (Virgen de la Luz), una residencia de ancianos (Hospital de Santiago) y un santuario (Nuestra Señora de las Angustias).

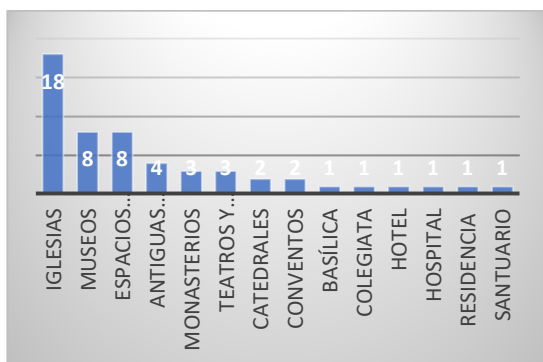


Figura 7. Número de espacios que han albergado actividades de la Semana atendiendo a su función



Figura 8. Fotografía de Santiago Torralba de un concierto del Vocalconsort Berlin en la antigua Iglesia de la Merced (SMR)

Si se atiende a la ubicación geográfica de estos espacios, la mayor parte de ellos, 35, se emplazan en la ciudad de Cuenca, aunque otros dieciséis se sitúan en otros puntos de la provincia (tres en Alarcón, dos en Tarancón y uno en Arcas, Belmonte, Carrascosa del Campo, Cardenete, Garaballa, San Clemente, Valeria, Valdecabras, Villaconejos del Trabaque, Villanueva de la Jara y Villar de Cañas). También se ha viajado en cuatro ocasiones a otros puntos de la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha, más en concreto a dos sitios distintos de Talavera de la Reina y una de Ciudad Real y Valdepeñas.

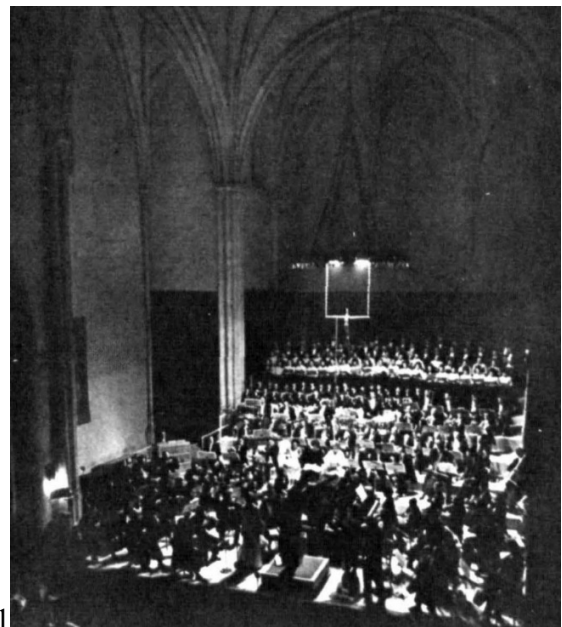


Figura 9. Imagen de un concierto en la antigua Iglesia de san Pablo en 1974 [1]

En otro orden, también es interesante analizar el número de ediciones diferentes en las que cada espacio ha albergado propuestas de la Semana. En primer lugar, cabe citar la antigua Iglesia de san Miguel, con cincuenta, seguida de la Iglesia Románica de Arcas (47), la antigua iglesia de san Pablo o de los Padres Paúles (34), el Teatro Auditorio de Cuenca (28), la Catedral de Cuenca (27), la antigua Iglesia de la Merced (trece), la Casa de la Cultura, actual Biblioteca Pública del Estado en Cuenca “Fermín Caballero” (doce), el Monasterio de la Concepción Francisca (diez), el Espacio Torner (ocho), la sede de la UIMP de Cuenca (seis) y el Aula Cultural Universidad Abierta de la UCLM en Cuenca, la Fundación Antonio Saura y el Museo de Arte Abstracto Español, con cinco cada una.

La Iglesia de san Felipe Neri y la de Santa Cruz han acogido actividades en cuatro ocasiones, mientras que el Hospital de Santiago, la Iglesia de la Asunción de Tarancón, la de la Luz, el Monasterio de Uclés, el Museo de las Ciencias y el Diocesano hicieron lo propio en tres.



Figura 10. Fotografía de Santiago Torralba de un concierto en la antigua Iglesia de la Merced de 2013 (SMR)

En dos ediciones de la Semana se han celebrado propuestas en el Convento de las Religiosas Justinianas de San Pedro, la Colegiata de Belmonte, el Edificio Colmillo de la UCLM, la Escuela de Artes “Cruz Novillo”, el Hospital Virgen de la Luz, la iglesia de san Pedro, la de Santa María de Alarcón, el Convento de Santa Catalina de Talavera de la Reina y el Parador de Cuenca).



Figura 11. Imagen de la antigua iglesia de san Miguel y del Casco Antiguo de Cuenca en 1971 [3]

Por último, en tal solo una ocasión se han desarrollado eventos del festival en Ars Natura, el Auditorio de Tarancón, la Basílica de Nuestra Señora de la Asunción de Villanueva de la Jara, la Catedral de Ciudad Real, el Conservatorio Profesional de Música de Cuenca “Pedro Aranaz”, las iglesias de la Asunción de Nuestra Señora de Cardenete, la Asunción de Valdepeñas, la Natividad de Carrascosa del Campo, Nuestra Señora de la Asunción de Alarcón, de san Julián, san Juan Bautista de Alarcón, san Román, Santiago Apóstol de San Clemente, Valdecabras, Villaconejos del Trabaque, del Salvador, Valeria y Villar de Cañas, el Monasterio de Tejeda de Garaballa, el Museo Casa Palacio, el Paraninfo de la UCLM en Cuenca, el Salón de Actos de Diputación de Cuenca, el Santuario de Nuestra Señora de las Angustias y el Teatro Palenque de Talavera de la Reina.

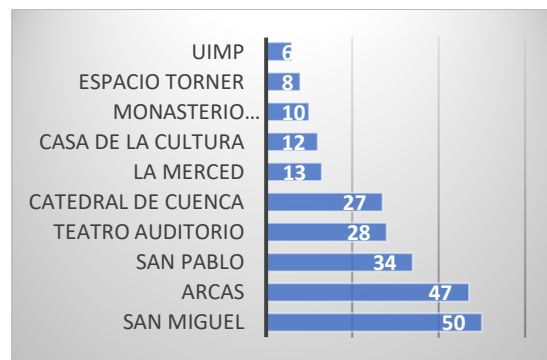


Figura 12. Espacios que han acogido actividades de la Semana de Música Religiosa de Cuenca en más ediciones diferentes

4. CONCLUSIONES

Como se ha tratado de evidenciar en este trabajo, la Semana de Música Religiosa de Cuenca ha realizado las actividades que han conformado sus programas en las sesenta ediciones que han podido celebrarse hasta la fecha en 54 espacios distintos. Veintiocho de ellos poseían función religiosa en el instante en el que albergaron estas propuestas (dieciocho iglesias, tres monasterios, dos catedrales, dos conventos, una basílica, una colegiata y un santuario). El resto, veintiséis, no lo tenían (en este último grupo se dan cita cuatro iglesias desacralizadas y dos antiguos conventos).



Figura 13. Espacios con función religiosa y sin ella que han albergado eventos en la Semana de Música Religiosa de Cuenca

En consecuencia, la SMR ha atendido en su programación de forma preeminente a espacios atendiendo a su belleza, amplitud y adecuación para albergar conciertos y otras propuestas de forma independiente a su función. En este sentido, cabe destacar el gran número de museos, ocho en total, en los que se han celebrado recitales y otros eventos. Así, se ha propiciado una interrelación entre artes de gran interés. También hay que subrayar el núcleo existente de espacios culturales y educativos, entre los que se citan las dos universidades que se ubican en Cuenca, la UCLM y la UIMP, y la escuela de artes.

En otro orden, el festival tiene como centro la ciudad de Cuenca, aunque también ha atendido a la provincia, ya que dieciséis espacios se han situado en otras localidades de esta. Del mismo modo, la Semana ha viajado, aunque en menor medida, a algunas poblaciones castellanomanchegas, tres en total.

Llama la atención el hecho de que ninguna ubicación se haya utilizado en todas las ediciones. Este hecho puede deberse a las decisiones tomadas por los directores artísticos al no considerarlas adecuadas a su propuesta por uno u otro motivo, a su estado, a las obras que se estarían realizando en ellas, al cambio de su función, a que todavía no estaban construidas o a diferentes causas.

Como propuesta de ampliación, este estudio podría desarrollarse analizando en concreto las características acústicas de cada espacio, la cantidad de eventos que se han

albergado, el tipo de conjunto musical que protagonizó cada uno de ellos, los repertorios interpretados y otras muchas variables.

12. REFERENCIAS

- [1] F. Lerdo de Tejada, “Cuenca. Su XIII Semana de Música Religiosa”, *Ritmo*, no. 441, pp. 8-9.
- [2] M. A. de la Ossa, *La Semana de Música Religiosa de Cuenca (2001-2019): Protagonistas, obras y gestión*, Libargo, Granada, 2020.
- [3] C. Gómez Amat, “La décima Semana de Música Religiosa de Cuenca”, *Bellas Artes*, no. 9, pp. 38-40.
- [4] M. A. de la Ossa, *La Semana de Música Religiosa de Cuenca (1962-2021): Análisis, claves y contexto*, Cuenca, Ediciones de la UCLM/Diputación de Cuenca.
- [5] “IV Semana de Semana de Música Religiosa de Cuenca”, *Ritmo*, no. 351, p. 10.



ESTUDIO ACÚSTICO DEL CONSERVATORIO DE MÚSICA PEDRO ARANAZ DE CUENCA

Abel Segura López^{1*}
Samuel Quintana Gómez²
Marcos David Fernández Berlanga³

¹UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca

^{2,3} UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca – Grupo GAMMA

RESUMEN

Este trabajo tiene por objetivo la evaluación acústica del auditorio del conservatorio Pedro Aranaz de Cuenca, el cual se apoyará sobre 3 pilares fundamentales:

El primero es la caracterización acústica de la sala mediante medidas “in situ” de acuerdo con la norma ISO-3382. El auditorio funciona como sala de concierto y ensayo, por lo que se estudiarán las características colocando fuentes y receptores en ambas configuraciones. La sala tiene una geometría inusual, ya que tiene una altura de 8.5 m, cuenta con paneles acústicos móviles a modo de persianas y posee un difusor curvo en el techo. Para realizar las medidas se emplearán los programas EASERA 1.2.13 y DIRAC 6 para comparar los métodos de medida y resultados de ambos.

El segundo es la creación de un modelo de simulación electroacústica. Debido a la geometría de la sala y a la ausencia de planos, se ha recurrido a un sistema LiDAR como apoyo a la hora de generar el modelo 3D que se ajustará y validará mediante el programa EASE 4.4.

Finalmente, se diseñará y distribuirá una encuesta de percepción para tratar de relacionar los aspectos subjetivos de la percepción con los resultados experimentales más destacables y realizar comparativas entre diferentes grupos de personas.

ABSTRACT

This work aims to carry out an acoustic evaluation of Cuenca’s Conservatory Pedro Aranaz auditorium. It will be based on three fundamental pillars:

First, there is the acoustic characterization of the auditorium through “in situ” measurements following ISO-3382 standards. The auditorium serves both as a concert and

rehearsal hall, so its characteristics will be studied by placing sources and receivers in both configurations. The room has an unusual geometry, with a height of 8.5 m, movable acoustic panels working as blinds, and a curved diffuser on the ceiling. The measurements will be conducted using the EASERA 1.2.13 and DIRAC 6 software programs to compare measurement methods and their respective results.

Second, the creation of an electroacoustic simulation model is planned. Due to the room’s geometry and the lack of blueprints, a LiDAR system has been employed to assist in generating a 3D model. This model will be adjusted and validated using the EASE 4.4 program.

Finally, a perception survey will be designed and distributed to correlate subjective aspects of perception with the most notable experimental results and conduct comparisons among different groups of people.

Palabras Clave— ISO-3382, acústica arquitectónica, modelo geométrico, encuesta de percepción, auditorio.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos de un conservatorio, se nos viene a la cabeza un edificio con una acústica óptima pensado para el desarrollo de actividades musicales. Por este motivo, se estudiarán una serie de parámetros acústicos en el auditorio principal del conservatorio Pedro Aranaz de Cuenca con el fin de evaluar si realmente las condiciones de este son adecuadas.

La sala (figura 1) tiene una forma paralelepípedica con un techo que termina en una estructura triangular donde se encuentra colgado un difusor acústico con forma de barcaza. El auditorio posee unas dimensiones aproximadas de 19 m de

* *1*: abelseguralopez@outlook.es

Copyright: ©2023 First autor et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

largo, 12 m de ancho y una altura máxima de 8.5 m. El número aproximado de asistentes es de 200, divididos entre 2 áreas de audiencia en la planta baja y un palco que simplemente tiene un uso ceremonial, por lo que no se estudiará al no ser relevante.



Figura 1. Fotografías del interior del auditorio del conservatorio

2. MEDIDA

En este apartado se detallará la metodología de medida seguida para la obtención de resultados. Por un lado se especificará dicha metodología junto a los equipos empleados y las posiciones de fuentes y receptores sobre un esquema de la sala. Por otro lado se mostrarán los resultados más relevantes de medida. Para llevar a cabo la medida se ha recurrido la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos” [1].

2.1. Metodología de medida

Toda la metodología se ha realizado de acuerdo con la ISO 3382-1. Los equipos empleados han sido una tarjeta de sonido Roland Rubix 22, micrófonos omnidireccionales B&K 4190-L con el previo B&K 4720, el acondicionador de señal B&K Nexus 2690, el HATS B&K 4100, un par de micrófonos AudioTechnica AT4050 con patrón de direccionalidad variable, un amplificador B&K 2716, una fuente omnidireccional B&K 4296 y una fuente vocal B&K 4720. Los programas empleados han sido EASERA 1.2 y DIRAC 6.

Como se ha mencionado en el resumen, la sala se emplea en 2 configuraciones principales: concierto (S1) y ensayo (S2). En ambos casos consideraremos 2 posiciones de fuente y 6 posiciones de medida. Debido a la simetría de la sala, en la posición de concierto únicamente es necesario estudiar un

área de audiencia. En la posición de ensayo, no se encuentran músicos en la zona de la segunda área, por lo que se reutilizarán los puntos de medida de la primera.

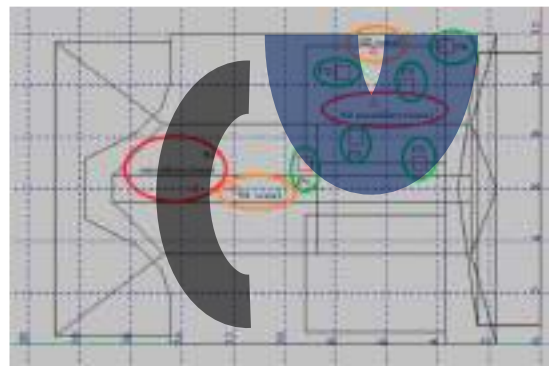


Figura 2. Distribución de posiciones de fuente y receptores en la sala

La posición de concierto está representada por el sombreado negro, donde los músicos se orientan hacia el público en las áreas de audiencia (el ancho de la agrupación puede variar en función de si se trata de un único intérprete o una agrupación). En este caso la fuente vocal está orientada hacia las áreas de audiencia ya que el hablante se dirigirá hacia el público.

La posición de ensayo está representada por el sombreado azul. Esta posición es más propia de la orquesta y la banda. En este caso, la fuente vocal sí se encuentra orientada hacia los músicos (ya que es el director quien les dirige la palabra) y podemos mantener las posiciones de medida ya que al no haber público, los receptores son los propios intérpretes.

Los parámetros que evaluaremos serán el tiempo de decaimiento temprano (EDT) y la claridad (C80). Estos se estudiarán entre 63 Hz y 8 kHz con DIRAC (añadiendo una banda inferior y superior a lo indicado por la norma) y entre 125 Hz y 8 kHz con EASERA ya que este programa no permite evaluar los resultados por debajo de esta frecuencia.

Debido a la peculiaridad de los paneles móviles presentes en los laterales del recinto, estudiaremos el comportamiento de la sala con estos abiertos o cerrados. También se realizará una medida de coeficiente de absorción para caracterizarlos y poder incluirlos en el modelo de simulación.

2.2. Resultados de medida

En este apartado mostraremos los resultados de medida de EDT y C80 para ambas posiciones (concierto y ensayo), estados de la sala (paneles abiertos y cerrados) y con ambos programas. Las curvas representadas son el promedio de todas las posiciones de medida.

La nomenclatura empleada en las leyendas es *PAR_{snX}* donde *PAR* indicará el parámetro, *sn* la posición de interpretación y *X* el estado de los paneles.

En las figuras 3 y 4 encontramos las gráficas de EDT obtenidas mediante los 2 programas de medida empleados.

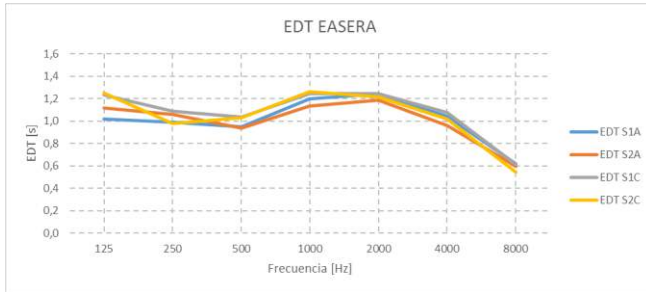


Figura 3. Resultados de medida EDT EASERA

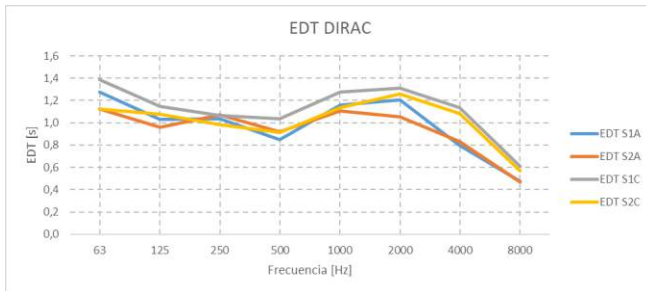


Figura 4. Resultados de medida EDT DIRAC

Podemos comprobar como la posición de la agrupación musical o el estado de los paneles apenas tiene influencia ya que el comportamiento espectral es similar. También se puede apreciar la misma tendencia en la curva con ambos programas.

En la figura 5 encontramos una comparativa de la curva entre ambos programas estableciendo como criterio comparativo la posición de concierto con los paneles abiertos. Ambos programas nos arrojan un resultado muy similar con diferencias del JND inferiores al 5%. Entendiendo el JND (umbral diferencial) como la diferencia mínima perceptible entre los valores de un parámetro [2].

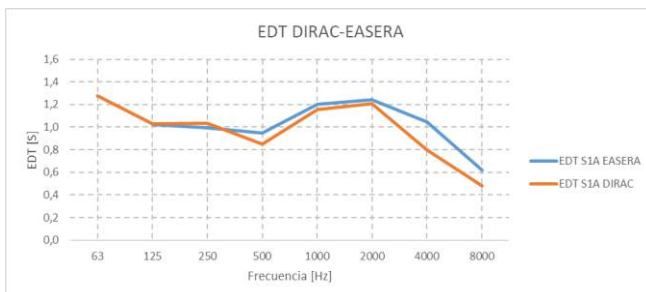


Figura 5. Comparativa EDT EASERA-DIRAC

El caso de C80 es más particular, como se ve reflejado en las figuras 6 y 7.

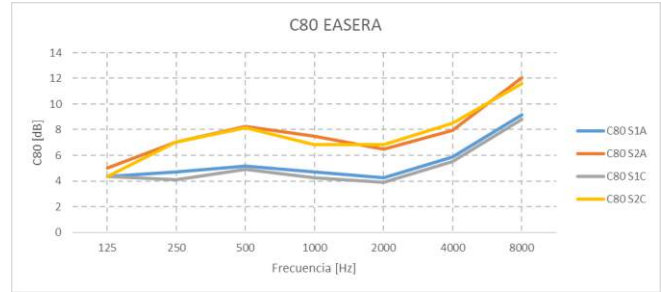


Figura 6. Resultados de medida C80 EASERA

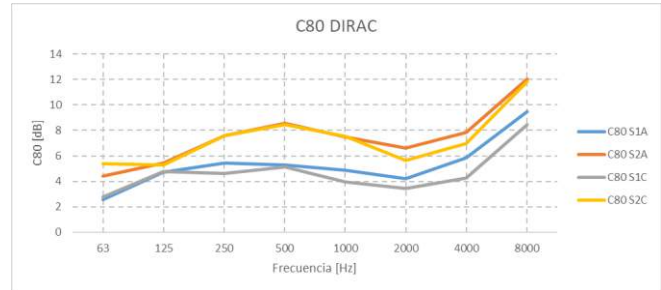


Figura 7. Resultados de medida C80 DIRAC

De estas gráficas podemos extraer que el estado de los paneles apenas tiene influencia sobre la sala, pero la posición de fuentes y receptores sí influye, lo que se refleja en la diferencia de claridad en las configuraciones estudiadas.

La gráfica de la figura 8 muestra una comparativa entre los resultados de este parámetro obtenidos con ambos programas. Podemos apreciar que el resultado de medida es prácticamente idéntico (la mayor diferencia se encuentra en la banda de 250 Hz y es menor al JND), por lo que podemos validar los resultados de EASERA y DIRAC.

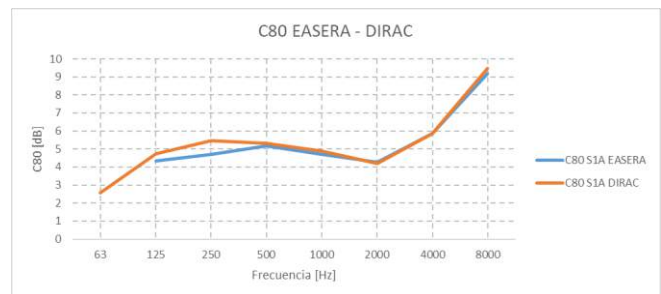


Figura 8. Comparativa C80 EASERA-DIRAC

3. SIMULACIÓN

En este apartado se detallará la metodología de simulación, un resumen del ajuste del modelo y algunos resultados de la misma comparándolos con los de medida.

3.1. Metodología de simulación

La simulación parte de una nube de puntos obtenida con LiDAR. En la figura 9 encontramos una vista de la sala.



Figura 9. Nube de puntos de la sala generada por LiDAR

Tras filtrar los puntos, se ha empleado el programa AutoCAD de la suite de Autodesk para extraer unos cortes de la sala y poder obtener las medidas necesarias para el modelado de la sala en EASE (figura 10).

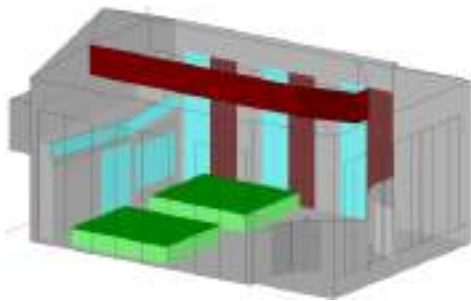


Figura 10. Modelo EASE auditorio

Algunas peculiaridades del modelo son la capacidad de estudiar el estado de la sala con paneles abiertos y cerrados sustituyendo las parejas de superficies panel – pared por ventana – panel. También es destacable que la barcaza se encuentra “hundida” en el techo ya que en esa zona no aparecen puntos de la nube y por tanto podemos asumir que no habrá presencia de reflexiones sonoras.

3.2. Ajuste del modelo

El ajuste del modelo se ha realizado en base a 2 parámetros: tiempo de reverberación y claridad.

La reverberación depende principalmente de los materiales empleados y la absorción del aire (principalmente en alta frecuencia) [3]. La elección de los materiales se ha realizado empleando las bases de datos integradas en EASE. Con los resultados de medida, podemos elegir el tipo de yeso, madera o parqué que permite aproximar la reverberación del modelo con la real [4].

La claridad depende principalmente de la distribución de los materiales y la geometría de la sala, por lo que asumiendo que

la geometría es adecuada se ha modificado la difusión de las superficies geoméricamente más complejas [5].

También es destacable la caracterización de los paneles acústicos (persianas). Para ello, se ha recurrido a las teorías de Helmholtz [6], donde se muestran los cálculos para caracterizar un resonador múltiple de cavidad a base de paneles perforados o ranurados. La frecuencia de resonancia teórica del panel vacío se encuentra en torno a 378 Hz. Para medir el coeficiente de absorción con DIRAC se ha recurrido a la norma ISO 13472-1:2022 [7]. Los resultados de medida muestran que el máximo se encuentra en el tercio de octava de 200 Hz, lo cual coincide con la teoría, que dicta que la frecuencia de resonancia del panel relleno es aproximadamente la mitad que la del panel vacío. Asignando el material de la base de datos de EASE que más se ajusta al proceso experimental

Para realizar la simulación hemos incluido el SPL de la fuente empleada, un *patch size* de 0.5 metros (aproximadamente una silla) y el ruido medido “in situ”. El número de partículas ha sido de 1834000 (*Very High Resolution, Slow*), la longitud de 2470 ms (*Extended, Slow*) y el valor por defecto para las superficies sin datos de difusión ha sido la opción de *Default S-Curve*. El techo, los paneles y las áreas de audiencia se ajustaron con una difusión desde el 40% en 400 Hz hasta el 20% en 4 kHz.

3.3. Resultados de simulación

Los resultados de simulación, que se han obtenido mediante el módulo AURA [8] se mostrarán en conjunto con los de medida. Para obtener mejores resultados seguiremos la guía de comparación de simulación acústica y medida de Cheol Ho Jeong [9]. Esta publicación recomienda mostrar los valores medios, mínimos y máximos de medida en todos los puntos para evaluar de forma más completa el recinto.

Para el caso del tiempo de decaimiento temprano podemos apreciar la gráfica comparativa entre medida y simulación en la figura 11.

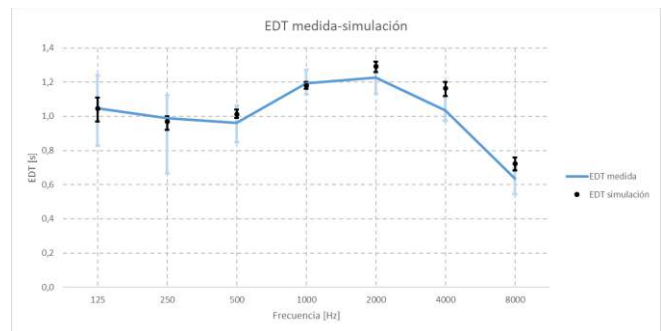


Figura 11. Comparativa EDT entre medida y simulación

Podemos considerar válido este parámetro ya que se puede apreciar que la simulación mantiene el mismo comportamiento que la medida “in situ” y se encuentra dentro de los márgenes de variación espacial.

En la figura 12 podemos encontrar representado el EDT medido junto a unas barras verdes que nos indican la diferencia con la simulación. Las barras rojas son el JND definido en la norma ISO 3382, por lo que si la barra verde se encuentra por debajo de la roja podemos concluir que no hay diferencia perceptible entre medida y simulación.

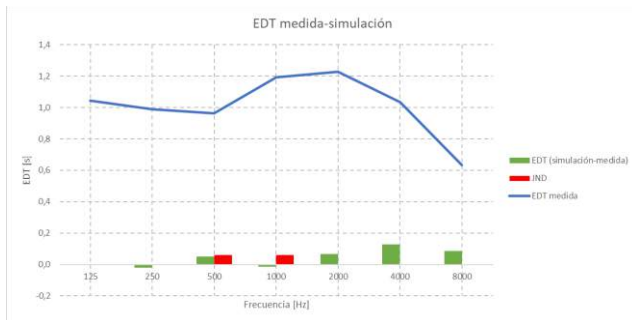


Figura 12. Diferencia entre el valor promedio medida-simulación y JND

Podemos comprobar como el JND en las bandas de 500 Hz y 1 kHz es superior a la diferencia entre el resultado de medida y simulación ya que el tiempo de reverberación del modelo se ha ajustado con el medido en la sala. Se ha centrado el estudio del JND sobre las bandas de interés establecidas en la norma ISO 3382 para calcular el valor promediado en frecuencia de número único.

En la figura 13 podemos apreciar la comparativa entre la claridad medida y la obtenida mediante simulación.

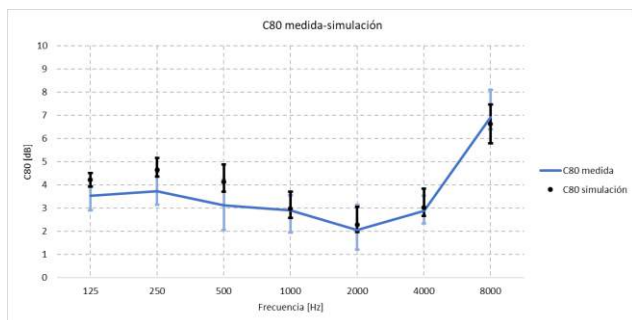


Figura 13. Comparativa C80 entre medida y simulación

Con este parámetro nos encontramos con un resultado similar al del EDT. Podemos apreciar como los comportamientos de C80 en simulación siguen la misma tendencia respecto a la medida.

En la figura 14 encontramos una comparativa de C80 entre simulación – medida y JND.

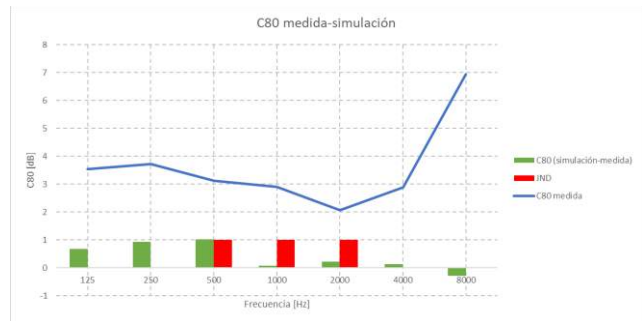


Figura 14. Diferencia entre el valor promedio medida-simulación y JND

Para las bandas de interés se ha conseguido ajustar el valor de C80 con un valor igual o inferior al JND ya que al igual que con la reverberación, la claridad ha sido un parámetro ajustado con las medidas “in situ”. Puesto que el JND de la claridad es de 1 dB, podemos asumir que el valor medio entre medida y simulación no será perceptible.

4. ENCUESTA DE PERCEPCIÓN

En este punto detallaremos el diseño de la encuesta realizada y trataremos los resultados obtenidos.

4.1. Diseño de la encuesta

La encuesta se ha llevado a cabo en papel con el fin de aumentar la predisposición de los asistentes a rellenarla. Debido a que la mayoría de músicos profesionales no suelen poseer conocimientos en ingeniería acústica no se ha considerado necesario realizar una encuesta diferenciada. Esta se ha repartido a lo largo de 3 días, donde se consiguió encuestar al 100% de los 65 asistentes a las audiciones y durante las cuales se llevaron a cabo interpretaciones de distintos géneros musicales y agrupaciones o conjuntos de músicos. Únicamente se dispone de 4 opciones por pregunta. Se ha descartado un número impar para evitar la respuesta de compromiso (en caso de duda la respuesta central) y se ha considerado que 6 opciones eran demasiadas y se dificultaba la redacción de las respuestas, ya que estas siguen la estructura de “poco – razonablemente – bastante – muy” [10].

En primer lugar nos encontramos con una pregunta “cero” de control que nos permitirá clasificar los resultados según el sexo (hombre o mujer), la edad (menor de 25 años y mayor de 25 años) y los conocimientos musicales (separando los alumnos de educaciones elementales de los de educaciones profesionales o superiores).

La primera pregunta hace referencia al tiempo de reverberación y es: “¿Cómo describiría la duración del sonido después de que se extinga la fuente sonora?”. Las opciones son menos de 1 segundo, entre 1 y 5 segundos, entre 5 y 10 segundos y más de 10 segundos. Dado que el tiempo de

reverberación se mide en segundos, que es una magnitud conocida, podemos incluir este parámetro en las respuestas de forma directa. Se ha elegido un rango temporal amplio en cada opción para tratar de minimizar las posibles dudas y facilitar la elección de una respuesta ya que si empleamos rangos de 1 o 2 segundos podría haber más confusión.

La pregunta referente a la claridad (C80), definición (D) y tiempo central (Ts) es la misma ya que la norma ISO-3382 agrupa estos 3 parámetros en el aspecto subjetivo de “claridad del sonido”. La pregunta es la siguiente: “¿Cómo describiría la nitidez o claridad de los sonidos?”. Debido a que no podemos preguntar por decibelios o milisegundos, las respuestas varían de poco claros o nítidos hasta muy claros o nítidos. Ya que el rango típico de C80 según la ISO-3382 es de -5 dB a 5 dB, consideramos que poco claros o nítidos representa menos de -5 dB, razonablemente claros o nítidos de -5 a 0 dB, bastante claros o nítidos de 0 a 5 dB y muy claros o nítidos más de 5 dB.

4.2. Resultados encuesta

Los resultados promediado en frecuencia de número único de EDT son 1.05 s con EASERA y 1 s con DIRAC, lo cual se corresponde con la respuesta del 65% de los encuestados, que valora el tiempo de reverberación de la sala entre 1 y 5 segundos. El 21% de los encuestados ha percibido el tiempo de reverberación entre 5 y 10 segundos. El grupo que más ha aportado a este porcentaje son las mujeres menores de 25 años con conocimientos musicales del tercer día. Dado que se trataba de una audición de violín, es posible que estas mujeres confundieran el tiempo de reverberación de la sala con el tiempo que dura un golpe de arco (el tiempo que puede estar el arco del violín sobre la cuerda produciendo sonido).

El C80 arroja un promediado en frecuencia de número único alrededor de los 5 dB con ambos programas (4.94 dB con EASERA y 5.09 dB con DIRAC). El 54% de los encuestados ha percibido un valor de claridad entre 0 y 5 dB y el 26% un valor superior a esos 5 dB. De los resultados parciales podemos extraer que el día que hubo una audición de viento de alumnos de educaciones profesionales, la percepción de la claridad era mayor al día que la audición era de violín y alumnos de educaciones elementales, lo cual se puede asimilar a que los estudiantes avanzados son capaces de generar un sonido considerado más claro.

5. CONCLUSIONES

Se han contrastado los resultados experimentales obtenidos mediante 2 programas de medida cuyos resultados son muy similares y se encuentran por debajo del JND, consiguiendo a su vez diseñar, ajustar y validar un modelo de simulación creado con EASE en el que se pone de manifiesto la utilidad de sistemas como el LiDAR. La encuesta de percepción ha

permitido obtener una valoración perceptual de la acústica de la sala y confrontarla con los resultados experimentales. Este trabajo trata de remarcar la importancia de integrar en la acústica de recintos los procesos de medida, simulación y percepción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «UNE-EN-ISO 3382-1:2010,» [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0044829>. [Último acceso: 5 septiembre 2023].
- [2] Agustín Martín Domingo. Universidad Politécnica de Madrid, «Apuntes de acústica,» [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>. [Último acceso: 12 septiembre 2023].
- [3] Remy Wenmaekers, Constant Hak and Maarten Hornikx, «The effective air absorption coefficient for predicting reverberation time in full octave bands,» The Journal of the Acoustical Society of America, nº DOI:10.1121/1.4901710.
- [4] Ruiguang Yu, Erhao Ma, Li Fan, Jun Liu, Bing Cheng and Zhilu Jiang, «Effects of Different Building Materials and Treatments on Sound Field Characteristics of the Concert Hall,» 5 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings12101613>. [Último acceso: 10 septiembre 2023].
- [5] Shtrepi, L., Pelzer, S., Rychtáriková, M., Vitale, R., Astolfi, A., & Vorländer, M., Objective and subjective assessment of scattered sound in a virtual acoustical environment simulated with three different algorithms. In 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2012, INTER-NOISE 2012 (Vol. 8, pp. 6807–6818), 2012.
- [6] A. C. Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [7] «ISO 13472-1:2022,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/77032.html>. [Último acceso: 7 septiembre 2023].
- [8] AFMG, «AURA 4 Module,» [En línea]. Available: <https://www.afmg.eu/en/aura-4-module>. [Último acceso: 10 septiembre 2023].
- [9] C. H. Jeong, «Comparison of room acoustics simulation and measurement,» agosto 2023. [En línea]. Available: https://www.linkedin.com/posts/cheol-ho-jeong-121a473_comparison-of-room-acoustic-simulation-activity-7096207270790709248-cjhY?utm_source=share&utm_medium=member_android. [Último acceso: 8 septiembre 2023].
- [10] R. Likert, «A technique for the measurement of attitudes,» junio 1932. [En línea]. Available: https://legacy.voteview.com/pdf/Likert_1932.pdf. [Último acceso: 7 septiembre 2023].

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO ACÚSTICO DE UN RECINTO ECLESIAÍSTICO COMO ESPACIO MULTIUSOS. LA IGLESIA DE SAN JULIÁN DE CUENCA (ESPAÑA).

Sergio Rubio Luque^{1*}
Samuel Quintana Gómez, José A. Ballesteros²

¹UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca

²UCLM – Escuela Politécnica de Cuenca – Grupo GAMMA

RESUMEN

En este estudio analizaremos la Iglesia de San Julián de Cuenca, en la que por motivos en su ejecución no disponemos de planos arquitectónicos del edificio ni detalles de los materiales de acabado interior. Crearemos un modelo acústico lo más semejante posible a la realidad para prever los problemas sonoros que puedan surgir del uso del espacio como recinto multiusos. Este modelo servirá para implementar distintas soluciones de sonorización tanto de instalación fija como de refuerzo sonoro adaptado a los distintos eventos que se puedan albergar.

Para ello, realizaremos una batería de medidas acústicas de caracterización según la norma ISO-3382, con las que generaremos un modelo de simulación que ajustaremos hasta obtener diferencias inferiores al valor JND entre los valores promedio de medición y los obtenidos en el modelo. Una vez validado el modelo desde el punto de vista estadístico, contrastaremos las diferencias JND, entre los valores obtenidos específicamente para cada punto de medida respecto de los obtenidos tras el método de trazado de rayos según el algoritmo AURA-CAESAR.

Finalmente realizaremos una auralización en los puntos clave del recinto, como pueden ser las posiciones de refuerzo sonoro, el escenario (situado en el altar mayor) y las posibles ubicaciones de los técnicos de control.

ABSTRACT

In this research the Church of San Julián in Cuenca will be acoustically analyzed, although digitalized plans or interior finishes were not available due to execution reasons.

For that, an acoustic model as similar as possible to reality will be designed to anticipate sound problems that may arise when this space will be used as a multipurpose room. The model will be used to test sound solutions, both for fixed

installation and for sound reinforcement, adapted to the different events that could be hosted.

Acoustic measurements were carried out according to ISO-3382 standard to design a simulation model that was adjusted to obtain differences lower than the JND value between the average measurement values and those obtained in the model. Once the model was validated from a statistical point of view, we have contrasted the JND differences between the values obtained specifically for each measurement point and those obtained after the ray tracing method with AURA-CAESAR algorithm.

Finally, we have carried out auralizations at key points of the church, such as the sound reinforcement positions, the stage (located on the main altar) and the possible locations of the control technicians.

Palabras Clave— Acústica de iglesias, acústica arquitectónica, modelo de simulación, parámetros acústicos, auralización.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los recintos eclesiásticos ha evolucionado y se han dejado de utilizar exclusivamente para el culto. Conciertos de cámara o representaciones teatrales y musicales son algunos de los usos añadidos a la liturgia tradicional, que hacen que sea necesario conocer la acústica del recinto y su respuesta frecuencial.

En esta comunicación se analizará la acústica de la Iglesia de San Julián de Cuenca, situada en la Plaza Reina Sofía N°2, en el barrio “Fuente del Oro” de Cuenca. Como se observa en la Figura 1, es un recinto de construcción moderna con forma semicircular en la zona del altar y rectangular en el área de audiencia. En su forma de construcción destacan los arcos transversales de madera que cruzan el eje longitudinal de la iglesia y soportan al techo escalonado. Tiene un volumen aproximado de 5.000 m³ y en su interior predominan

* **Autor de contacto:** sergio.rubio@uclm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

materiales como la madera, yeso y mármol. Encontramos yeso corrugado en todas las paredes laterales y en las verticales de los techos. La madera está presente en todo el techo y en los arcos, y el altar es completamente de mármol. Encontramos cristalerías sobre la puerta de entrada, en el techo justo encima del altar, en la parte posterior del altar y en los laterales superiores del techo. El suelo es de mármol y tiene una alfombra en el pasillo central. Del techo destaca su forma escalonada de los laterales y la convexidad de la madera de la parte central. El recinto es capaz de albergar a 300 personas sentadas.



Figura 1: Vista delantera de la Iglesia de San Julián según eje longitudinal.

Esta comunicación se estructura en tres partes: realización de las medidas in-situ que nos permitirán caracterizar la sala, diseño del modelo geométrico en 3D, validación del modelo según métodos de análisis estadísticos y geométricos, y contraste de los resultados mediante algoritmos de trazado geométrico (AURA).

2. MEDIDAS IN-SITU

La metodología de medida está basada en la norma UNE-EN ISO 3382 [1] con los equipos de refuerzo sonoro y sistemas de climatización desconectados. Las medidas se realizaron en una jornada de mañana y no hubo variación en las condiciones ambientales superior al 5 %. Las muestras se tomaron con una temperatura de 20 °C, una humedad relativa del 60 % y 1013 mbar de presión. El rango frecuencial cubierto para todas las medidas es superior al rango establecido por la norma (125 Hz a 4 kHz).

La grabación de las medidas se realizó tanto con el sistema cabeza-torso (HATS) situado sobre los bancos de la iglesia para simular la posición normal de los oyentes como con micrófonos omnidireccionales de precisión tipo 1. Este sistema de medida nos ha permitido obtener más información del recinto que se podrá utilizar en futuros estudios relacionados con los aspectos subjetivos de espacialidad.

Las medidas se han realizado en 6 posiciones según la recomendación de la norma UNE-EN ISO 3382 [1] en la que se establece ese número de posiciones para recintos con

capacidad inferior a 500 personas. Los puntos de medida, disponibles en la Figura 2, se han distribuido teniendo en cuenta la simetría del recinto y pensando en posibles posiciones estratégicas según el uso, por ejemplo, la posición P3 corresponde al lugar en el que se ubican los técnicos de sonido en el caso de representaciones teatrales, musicales, etc.

Se han elegido 3 puntos de emisión tomando como referencia la puerta de entrada (F1 en la parte superior trasera al altar, F2 en el centro del altar y F3 en un pilar lateral, cercano al sistema de refuerzo sonoro). Estas posiciones han sido elegidas específicamente según el uso del recinto. En la posición F1 se ubica la orquesta en representaciones musicales, F2 corresponde con la posición del orador habitual durante la liturgia, y F3 es la posición habitual del coro en los actos litúrgicos, además, es en la que se instalan preferentemente los sistemas de refuerzo sonoro estacados o descolgados en configuración habitual tipo line-array, que permiten enfocar el haz principal sobre las dos áreas de audiencia, situadas en los bancos laterales, para las representaciones teatrales y musicales.

Para la obtención de los parámetros de calificación, la sala se ha excitado mediante una señal radiada por una fuente omnidireccional [2] [3] [4]. Se han empleado barridos sinusoidales de excitación exponencial (e-Sweep), generados mediante el software DIRAC [5].

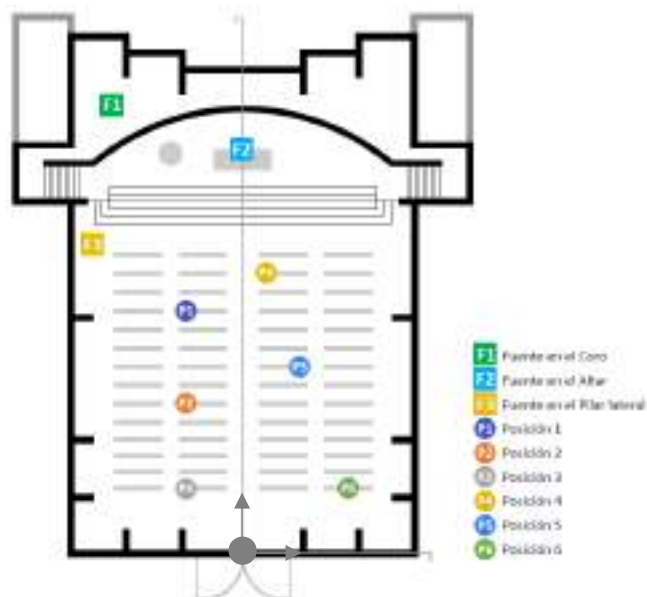


Figura 2: Posiciones de medida del estudio acústico.

Se utilizó este método de barridos porque es el que permite conseguir una relación señal a ruido (S/N) más elevada respecto a otros métodos de excitación MLS o barridos lineales [6].

En cada uno de los puntos de medida se han emitido tres barridos frecuenciales con una duración de 10,9 segundos,

suficiente para obtener la totalidad de la respuesta impulsiva y calcular el valor de los parámetros de reverberación (EDT), Calidez (BR), Brillo (Br) y Claridad (C_{50} , C_{80} y D_{50}). Cada una de las medidas se ha realizado con un margen dinámico superior a 35 dB para asegurar una señal de respuesta al impulso suficiente. Además de estos parámetros, también se han calculado los parámetros de ruido (Curvas NR y NC) a partir de la medida de ruido de fondo y sin la generación de señales de excitación.

Se han elegido los parámetros acústicos mencionados entre todos los que recoge la norma UNE-EN ISO 3382 [1] porque son los más interesantes para tomar como referencia a la hora de proponer los objetivos de diseño de configuraciones de refuerzo sonoro adecuadas para cada estilo de música o representación teatral que se desarrolle en la iglesia.

Los valores promedio en frecuencia de número único se han calculado con los valores obtenidos en el rango frecuencial comprendido entre 125 Hz y 4 kHz para cada fuente de emisión.

Las gráficas se han representado en el rango comprendido entre 63 Hz y 8 kHz con el objetivo de visualizar el comportamiento en alta y baja frecuencia, abarcando un mayor espectro frecuencial que el recomendado por la norma UNE-EN ISO 3382 [1].

3. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

En este apartado se expondrán los resultados derivados del procesamiento de las medidas para obtener los parámetros acústicos de calificación. En la Tabla 1 se exponen las magnitudes analizadas y los valores promedio para cada fuente de emisión, así como el rango típico recogido en la norma UNE-EN ISO 3382 [1] para auditorios y los recomendados por A. Carrión [7], L. Beranek [8] y H. Arau [9] para recintos eclesiásticos vacíos.

El objetivo de esta comparación es observar las diferencias debidas a la posición de la fuente, y comparar los resultados promediados tanto con el rango típico para auditorios como para el rango típico de iglesias según los criterios de referencia de los autores mencionados.

Tabla 1: Valores promediados en frecuencia de número único por fuente de emisión.

Aspecto subjetivo	Magnitud	Fuentes			Rango típico	
		F1	F2	F3	ISO 3382	Iglesias
Ruido	NC (dB)	30	30	30		30 [7]
	NR (dB)	35	35	35		35 [7]
Reverb.	EDT (s)	3,09	3,12	3,03	1,0 - 3,0	1,8 - 2,0 [8]
Calidez	BR	0,78	0,79	0,82		0,9 a 1,3 [9]
						1,1 a 1,45 [8]
Brillo	Br	0,77	0,77	0,77		$\geq 0,8$ [9]
						0,87 [8]
Claridad	C_{50} (dB)	-5,75	-4,81	-5,02		≥ 2 [10]
	C_{80} (dB)	-4,53	-3,73	-4,07	-5; +5	-4 - 0 [8]
	D_{50}	0,12	0,16	0,17	0,3; 0,7	0,5 a 0,65 [9]

La medida de ruido de fondo tuvo una duración de 30 segundos y se realizó sin generar ninguna señal de excitación y con todos los sistemas de climatización,

megafonía o eléctricos apagados. Aunque no sea un parámetro que evalúe la calidad de la sala, nos servirá para asegurar una S/N superior a 35 dB en los parámetros medidos.

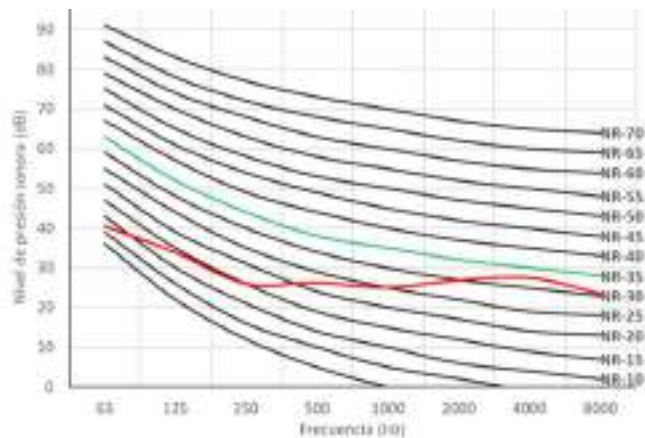


Figura 3: Evaluación de la curva NR de la iglesia.

Tanto las curvas NR como las curvas NC se encuentran dentro de los criterios recomendados por A. Carrión [7] al tener un valor NR=35 y NC=30. En la Figura 3 se muestra la curva NR que define el nivel de ruido que el espectro en frecuencia no debe sobrepasar para lograr que el nivel sea el adecuado para los oyentes, según la norma ISO 1996-1:2020 [11] que determina el nivel de ruido ambiente aceptable para la audiencia e inteligibilidad del discurso.

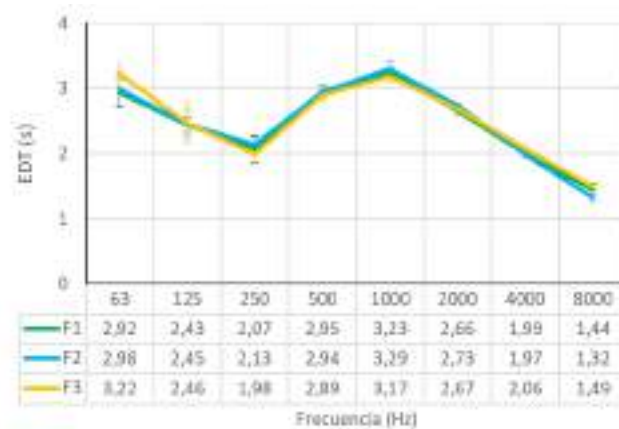


Figura 4: Tiempo de reverberación inicial EDT.

Analizando el parámetro de reverberación EDT de la Figura 4 se observa una diferencia de tiempo mínima entre las tres posiciones emisoras. Se aprecia una disminución del EDT en las frecuencias bajas cercanas a 250 Hz, y un aumento considerable en las frecuencias medias cercanas a 1 kHz. Las barras verticales muestran la variación entre los valores máximos y mínimos de reverberación obtenidos para los 6 puntos de medida en cada banda frecuencial. Se aprecia

una mayor dispersión espacial en baja frecuencia que va disminuyendo progresivamente a medida que alcanzamos las bandas de alta frecuencia.

A medida que aumenta la frecuencia, disminuye el tiempo de reverberación debido a que los materiales de la sala absorben más a alta frecuencia que a baja frecuencia, y además en alta frecuencia se suma la absorción propia del aire.

El EDT no es plano en frecuencia, lo que también afecta a los valores de Calidez (BR) y Brillo (Br). En las frecuencias medias comprendidas entre 500 Hz y 2 kHz se produce un aumento significativo de la reverberación. Además, ese intervalo frecuencial coincide con el espectro de la voz humana, por lo que habrá que tener en cuenta este aumento durante el proceso de ecualización de los espectáculos audiovisuales que se desarrollen en el recinto.

El aumento en las zonas de baja-media y media-alta frecuencia condiciona los valores de Brillo y Calidez. Ambos valores se encuentran por debajo de los niveles recomendados por L. Beranek [8] para recintos vacíos, lo que afectará a la percepción de la acústica del recinto en baja y alta frecuencia, generando una sensación de calidez y riqueza en armónicos insuficiente. Esta sensación se verá condicionada por el número de espectadores que acoja el evento, ya que cuanto más llena esté la iglesia, se producirá una mayor absorción del sonido por parte de los espectadores, y por tanto el tiempo de reverberación disminuirá notablemente.

En cuanto a claridad vocal, musical y definición, los valores se alejan del rango típico, por lo que no podremos esperar un buen resultado sonoro de los conciertos y teatros que se desarrollen en la iglesia con la acústica natural. La claridad vocal es inferior al valor recomendado por L. G. Marshall [10], la claridad musical sí está en el rango típico recogido en la ISO 3382 [1] para las tres posiciones de fuente sonora, pero se aleja del valor recomendado por L. Beranek [8] en la posición F1. Y en cuanto a la definición, los resultados para las tres posiciones de fuente no se encuentran entre los valores típicos recogidos en la ISO 3382 [1] y tampoco son cercanos a los valores recomendados por H. Arau [9].

Para mejorar la claridad vocal, musical y definición se recurre al sistema de refuerzo sonoro básico instalado en la iglesia para una correcta inteligibilidad de la palabra durante los actos litúrgicos, y además es necesario instalar un sistema de refuerzo sonoro para las representaciones teatrales y musicales, tanto para los espectadores en forma de P.A tipo line array, como para los actores en forma de monitores de escenario o in-ear.

Con la posterior simulación del recinto se podrá prever la instalación de un sistema de refuerzo sonoro que mejore estos parámetros durante las representaciones teatrales y musicales que se desarrollan en la iglesia, así como estudiar la configuración que mejor se adapte al espectáculo que se desarrolle.

4. DISEÑO DEL MODELO 3D Y VALIDACIÓN

La base del modelo geométrico, representada en la Figura 5, se ha realizado con el software Cinema 4D [12]. Este software permite exportar las superficies al software EASE [13], con el que se ha realizado la asignación necesaria de materiales y que servirá para estudiar la acústica del recinto.

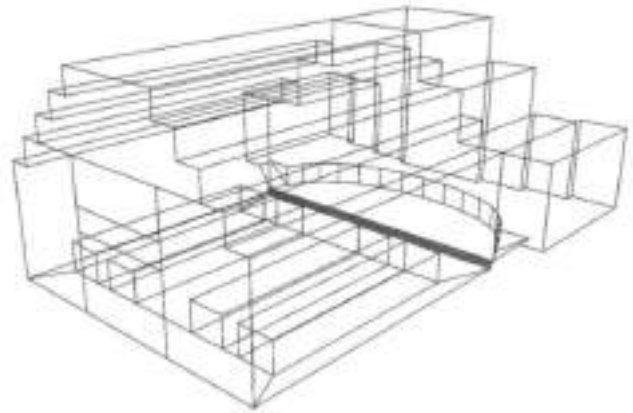


Figura 5: Perspectiva del diseño del modelo en Cinema 4D.

Realizar la base del modelo en Cinema 4D permitirá también tener una simulación del recinto para generar otros estudios como la escenografía o iluminación de los espectáculos teatrales que se desarrollen. Como no disponemos de planos digitalizados del interior ni acabados finales, se ha creado un modelo acústico lo más semejante posible a la realidad en base a la medición de las superficies y elementos geométricos del recinto con un distanciómetro láser y cinta métrica.

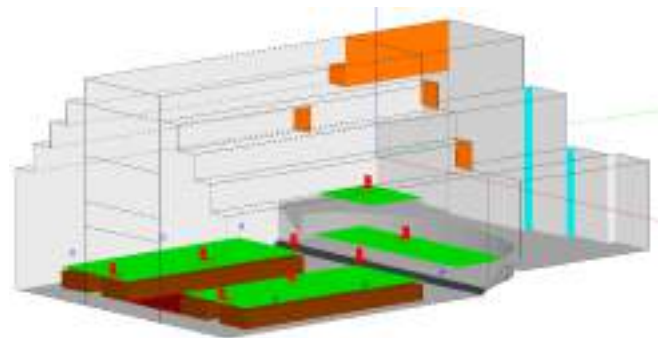


Figura 6: Prototipo 1 del diseño acústico en EASE.

Para ello se ha realizado una inspección visual de los materiales del recinto y se ha establecido que los materiales del prototipo son mármol, yeso, madera, moqueta y cristal. El modelo se ha ajustado mediante la convergencia entre la respuesta promedio del tiempo de reverberación EDT evaluado in-situ respecto al valor del tiempo de reverberación calculado por el programa a través de los materiales y geometría según Eyring.

En el prototipo inicial de diseño se ha partido de un modelo básico cuya geometría se ha completado en función de la comparación de los resultados simulados con los medidos in-situ hasta obtener un diseño más complejo con el que se ajuste al máximo el tiempo de reverberación.

El primer prototipo se muestra en la Figura 6, cuya geometría parte del diseño original. A este modelo se añadieron los materiales seleccionados tras la valoración del recinto y se realizó la primera simulación en EASE cuyo resultado se representa en color amarillo en la Figura 8. Con el primer análisis se consiguió una curva EDT semejante a la medida in-situ pero con los valores alejados de la realidad.

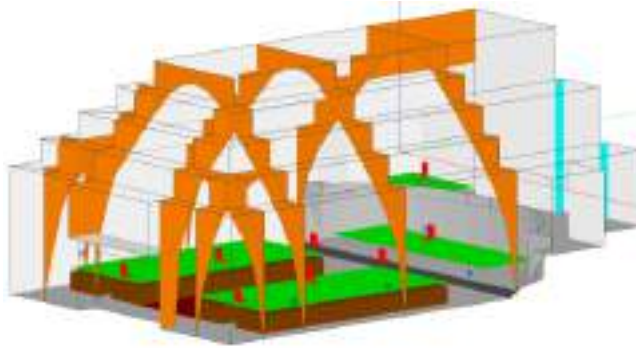


Figura 7: Prototipo 2 del diseño acústico en EASE.

El prototipo 2 se muestra en la Figura 7, y se realizó añadiendo elementos geométricos como los arcos de madera, además de ajustar la forma escalonada del techo en la zona de la puerta principal. Tras este análisis, comprobamos que el EDT disminuyó en torno a 1 segundo en la zona de baja-media frecuencia, como podemos ver representado en color naranja en la Figura 8.

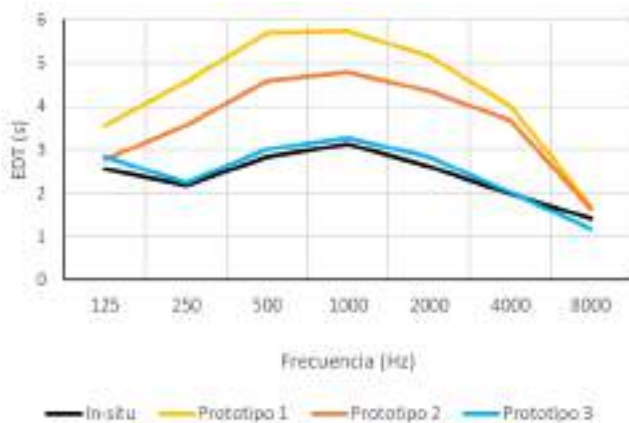


Figura 8: Comparativa entre RT medido in-situ y simulado.

Tras determinar que no había más elementos geométricos que añadir y obviando las superficies de cristal del techo debido a que son muy pequeñas en comparación con el resto de los materiales, las siguientes mejoras se realizaron

modificando las propiedades de los materiales, hasta conseguir el EDT representado en color azul en la Figura 8.

Con este prototipo se da por validado el modelo con el método de cálculo estadístico debido a que el tiempo de reverberación simulado presenta una desviación máxima del 5 % del JND. Se ha establecido un intervalo inferior al JND que marca los límites en los que se ha ajustado el tiempo de reverberación de la simulación.

A continuación, se calcula el EDT por el algoritmo CAESAR mediante el módulo AURA de EASE. Esta simulación se ha realizado con la configuración *Very High Resolution, Slow*, mediante la cual se han generado 1834000 partículas con una longitud de 2470 ms (*Extended, Slow*). Las superficies sin datos de difusión se han configurado con la opción por defecto *Default, S-Curve*.

En la Figura 9 se compara el EDT de la medida in-situ, representado en color negro, y el obtenido tras el ajuste por el método estadístico, representado en color azul, con el resultado de un primer análisis con AURA, representado en verde. Tras esta primera simulación con la que se ha obtenido un EDT muy superior al JND establecido, se ha añadido difusión a los distintos materiales que por su forma geométrica afectan en mayor medida a la difusión del sonido hasta conseguir el ajuste representado en color rojo en la Figura 9.

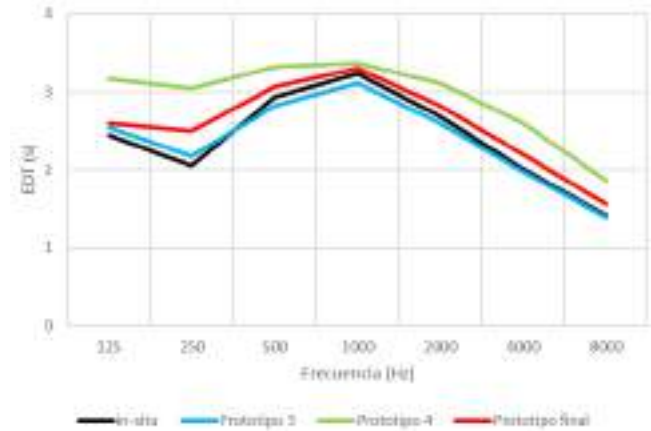


Figura 9: Ajuste del EDT con el módulo AURA.

La difusión añadida en el yeso de las paredes ha sido de un 50 % desde 1 kHz hasta un 80 % en 10 kHz. La difusión de la madera del área de audiencia ha sido un 60 % en 100 Hz hasta un 40 % en 2 kHz, y, por último, en el yeso del techo escalonado la difusión va desde el 80 % en 100 Hz hasta el 40 % en 4 kHz.

Siguiendo un modelo de difusión lineal entre las bandas de frecuencia, se consigue que el resultado del EDT mediante AURA se acerque más a los valores medidos in-situ y al EDT simulado mediante el modelo estadístico.

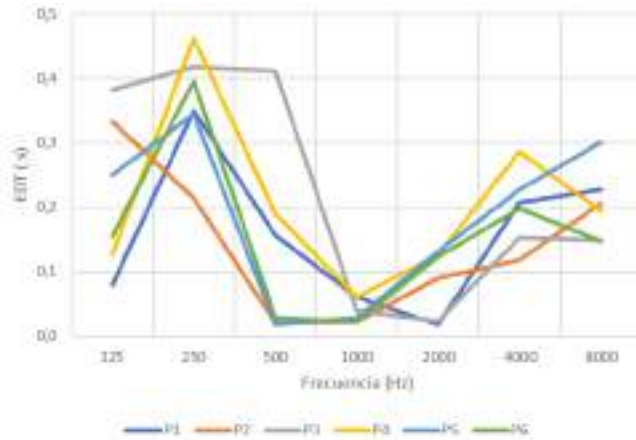


Figura 10: Diferencia entre EDT in-situ y simulado en AURA para cada posición de medida con la fuente F2.

En la Figura 10 se visualiza la diferencia entre el EDT promedio para cada punto de la medida in-situ con el promedio del resultado de la simulación con AURA para la fuente emisora F2. Se ha tomado esta fuente para realizar la comparación al tratarse de la posición en la que se ubica habitualmente el orador durante los actos litúrgicos, siendo la posición emisora más utilizada de entre las tres. Se comprueba que a baja frecuencia existe mayor diferencia de tiempo debido a la difusión del sonido.

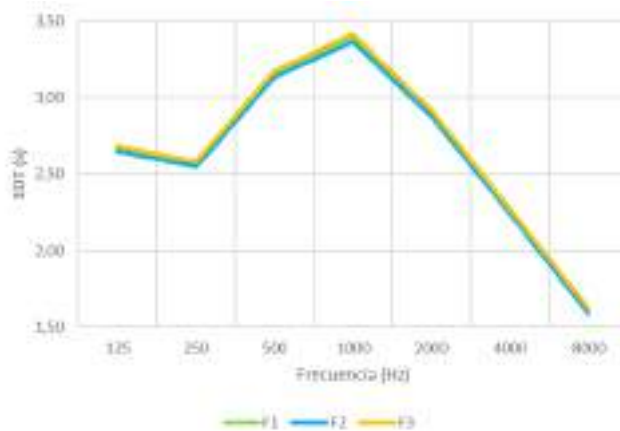


Figura 11: Tiempo de reverberación AURA en P3.

En la Figura 11 comparamos el EDT recibido en la posición P3, que corresponde con la posición de los técnicos de sonido e iluminación durante las representaciones teatrales y musicales. Como se puede apreciar, la diferencia de tiempos respecto de las tres posiciones de emisión es mínima, por lo que los técnicos percibirán el sonido emitido desde las tres posiciones de forma similar.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los parámetros medidos ha permitido caracterizar acústicamente la Iglesia de San Julián de Cuenca. Se ha obtenido que la iglesia cumple con el nivel recomendado de ruido de fondo, sin embargo, los tiempos de reverberación resultantes son elevados, sobre todo en las frecuencias centrales de 500 Hz y 1 kHz. En estas frecuencias tendremos un problema debido a que en ellas el sonido reverbera más y son frecuencias importantes en el espectro de la voz humana.

En cuanto a Brillo y Calidez, para ninguno de estos parámetros nuestro resultado se encuentra dentro de los recomendados, por lo que no tendremos esa sensación de calidez o resalte de agudos.

Los resultados de calidez vocal, musical y definición tampoco se encuentran dentro de los valores recomendados. Esto se traduce en que puede haber problemas de comprensión y diferenciación entre voces e instrumentos durante las representaciones musicales.

A partir del diseño y simulación electroacústico de la iglesia, se podrá prever la instalación de un sistema de refuerzo sonoro que resuelva los problemas acústicos según el tipo de evento que albergue el recinto, permitiendo incidir especialmente en la posición principal del evento mediante el análisis individual de las distintas posiciones de medida.

Tras analizar los resultados obtenidos de la simulación por métodos estadísticos y geométricos, comprobamos que no es suficiente con ajustar el tiempo de reverberación medido in-situ con el obtenido mediante métodos estadísticos, ya que la dispersión de los materiales afecta a la difusión del sonido, como hemos comprobado mediante el cálculo con el algoritmo AURA-CAESAR.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias a la colaboración y ayuda de la Parroquia de San Julián de Cuenca.

7. REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 3382-1:2010. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos. 2010.
- [2] UNE-EN IEC 60268-3:2018. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 3: Amplificadores.
- [3] UNE-EN IEC 60268-4:2018. Equipo de sistema de sonido. Parte 4: Micrófonos.
- [4] UNE-EN 60268-5:2004. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces
- [5] DIRAC: Room acoustics software. <https://www.bksv.com/en/products/Analysis-software/acoustic-application-software/building-acoustics/room-acoustics-software-dirac>. Último acceso: 22 de agosto de 2023.

- [6] Ferreyra, S. P., & Elías, J. M. Análisis comparativo de parámetros acústicos de recintos, utilizando diferentes técnicas de medición de la respuesta al impulso.
- [7] Antoni Carrión Isbert. Diseño acústico de espacios arquitectónicos, volume 4. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.
- [8] L. Beranek. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. Springer, 2003.
- [9] Higiní Arau. ABC de la Acústica Arquitectónica. Ceac Barcelona, 1999.
- [10] L. Gerald Marshall. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. The Journal of the Acoustical Society of America, 96(4):2251-2261, 1994.
- [11] UNE-EN ISO 1996-1:2020. Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedures. 2020.
- [12] Cinema4D. <https://www.maxon.net/es/productos/cinema-4d/cinema-4d/>. Último acceso: 22 de agosto de 2023.
- [13] EASE. <https://ease.afmg.eu/>. Último acceso: 20 de agosto de 2023.

REFLEXIONES SOBRE LA EVALUACIÓN ACÚSTICA EN ESTADIOS Y GRANDES RECINTOS MULTIPROPÓSITO.

*Mario Torices Fernández**
Esperanza Sánchez Romero²
Mariene Benutti Giunta³

^{1, 2, 3} IDOM CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE SAU

RESUMEN

A lo largo del presente artículo se recorre de forma sucinta la historia y la evolución reciente del diseño acústico de grandes recintos de representación musical o escénica. Y se analiza cómo esta metodología clásica se ajusta a los espacios multipropósito como los estadios deportivos, arenas y algunos grandes espacios de exhibiciones. Se identifican los principales parámetros o criterios de diseño acústico y se reflexiona sobre la necesidad de evolucionar de forma paralela a otras disciplinas de diseño multicriterio como la sostenibilidad, hacia algún sistema estandarizado de evaluación que permita comparar acústicamente la idoneidad de diferentes recintos e incluso valorar la mejora prestacional de este tipo de recinto al enfrentarse a una reforma o cambio sustancial.

ABSTRACT

In this article, we provide a concise overview of the historical development and contemporary advancements in the field of acoustic design for large musical or theatrical performance venues. We also examine how this traditional methodology aligns with versatile environments like sports stadiums, arenas, and large exhibition halls.

We outline the key parameters and criteria essential to acoustic design, and we deliberate on the importance of progressing in sync with other multi-criteria design disciplines, particularly in the context of sustainability. This evolution would lead to the establishment of a standardized assessment framework that enables acoustic comparisons across various venues even during refurbishments or significant alterations of the venues.

Palabras Clave— estadios, arenas, multipropósito, room acoustics, certificación.

1. INTRODUCCIÓN

La acústica de salas, concebida como una especialidad de diseño de espacios relacionados con el uso de la palabra, la música y las artes escénicas tuvo una gran evolución a mediados del siglo pasado con el auge de auditorios, salas de conciertos y diferentes tipos de teatros, así como la mejora en las capacidades de equipos de medida y simulación. Desde que en 1898 Wallace Sabine publicó la fórmula para estimar el tiempo de reverberación, hasta que Leo Beranek realizó sus estudios y compilaciones de medidas de múltiples recintos de los más variados usos, el desarrollo de la acústica natural sufrió un gran avance [1]. Sin embargo, desde entonces hasta nuestros días la evolución de parámetros de evaluación y los criterios acústicos de diseño óptimo de salas han evolucionado relativamente poco, comparados con otras disciplinas.

Si analizamos el proceso para establecer los criterios óptimos de diseño acústico de salas, se puede establecer un círculo virtuoso que comienza con la percepción subjetiva de la audiencia de un recinto en que se representa un tipo de evento determinado (palabra, tipos de música, representaciones, etc.) para concluir con un criterio de diseño que retroalimenta la experiencia en futuros recintos. Como se ha indicado, esta experiencia acústica está íntimamente asociada con el tipo de representación, pero no menos importante es su relación con la sensibilidad de la audiencia e incluso con sus expectativas al acudir al evento. Y por qué no ir más allá y entender que en las representaciones clásicas las obras muchas veces se compusieron para espacios de representación concretos, aprovechando las propiedades de esos recintos.

A finales del siglo pasado y comienzos de este, se ha producido una revolución en cuanto a las necesidades de diseño acústico en algunos recintos para la representación de artes escénicas multitudinarias, en su más amplio sentido del concepto. En este cambio de paradigma, el tipo de músicas y artes audiovisuales han cambiado drásticamente, la

sensibilidad del público ha cambiado incluso el ocio se ha convertido en un artículo de consumo masivo, por no olvidar los avances técnicos en los sistemas de reproducción audiovisual.

Es en este momento cuando nos planteamos la pregunta de si se deberían de mantener los criterios de diseño acústico, forjados a lo largo de los años en base a unas premisas antiguas, o deberían de evolucionar al igual que su entorno para poder diseñar, construir o reformar los grandes recintos multiusos para las artes escénicas del siglo XXI y facilitar su clasificación y comparación.

2. ACERCAMIENTO AL PROBLEMA EN ESTE COMIENZO DEL SIGLO

La respuesta a todo este cambio de era y de negocio del ocio ha llevado a utilizar las infraestructuras existentes para alojar estos eventos multitudinarios (estadios deportivos, arenas y grandes salas multiusos) dejando en manos de los equipos de reproducción audiovisual el tratar de controlar las respuestas de las salas en una primera etapa. Posteriormente, y a la vista de los resultados indeseados, se empezó a estudiar cómo adecuar los recintos existentes o construir recintos dedicados para que mejoraran sus prestaciones acústicas.

Diferentes autores, en diferentes proyectos con diferentes consideraciones y objetivos han llegado a resultados que, si bien difieren significativamente a nivel cuantitativo, en la mayoría de los casos los resultados fueron calificados como adecuados o incluso óptimos. Y ahí es donde surge la duda respecto si estamos intentando cuantificar un resultado de acústica óptima en base a métricas desfasadas o incluso que no pueden acotar la nueva sensibilidad o experiencia audiovisual que se pretende ofrecer a la audiencia.

Para analizar este fenómeno, se resumen a continuación los conceptos acústicos, de entre todos los que parámetros clásicos, que suelen condicionar el diseño acústico de grandes recintos polivalentes o multiusos (estadios, arenas, etc.).

3. CONCEPTOS ACÚSTICOS QUE HAN CONDICIONADO EL DISEÑO ACÚSTICO

Revisando la literatura existente sobre el diseño acústico de este tipo de grandes espacios polivalentes o multipropósito, se pueden extraer a grandes rasgos una serie de parámetros de uso común entre los distintos equipos de diseño, aunque no siempre se valoran en todos los diseños.

3.1. Tiempo de reverberación

Es el parámetro de diseño acústico principal por definición, ya que puede influir tanto en la percepción de sonoridad, la inteligibilidad y el control de reflexiones y ecos. Si bien es un parámetro muy representativo, no es suficiente para determinar el éxito de un espacio. Esto puede acreditarse en

la disparidad de valores de referencia y de valores medidos en diferentes estadios o grandes recintos de representación, entre ellos [2], [3]. Con carácter general este concepto podría evaluarse conforme a los índices T30, T60 o incluso EDT en función de la configuración geométrica del espacio [4]. Habitualmente este parámetro se solapa con fenómenos de coloración del recinto una vez se detallan las prestaciones de absorción acústica de los materiales y con el uso de otras ratios de absorción acústica respecto del volumen libre, sobre todo en las fases iniciales del proyecto

3.2. Distribución sonora

Bien sea para cumplir con los criterios marcados para el sistema PA/VA o bien por necesidades específicas de espectáculos o eventos, una buena cobertura sonora favorece la reducción de necesidades electroacústicas, mejora la percepción del espacio y facilita la generación de ambientes sonoros específicos entre otros de los objetivos acústicos habituales.

3.3. Reflexiones

El control y dominio de las reflexiones siempre ha sido la clave para alcanzar recintos de acústica excepcional en la teoría clásica. Sin embargo, cuando aplicamos este conocimiento en recintos de gran escala, las distancias entre fuente/receptor, así como la disparidad de localización y expectativas de las fuentes sonoras (público, escenario, sistemas PA/VA, etc.) hace que este análisis no sea tan fácil de aplicar de forma única y precise de un equilibrio entre los análisis sectoriales y los cálculos globales en función de la prioridad de los objetivos acústicos.

3.4. Inteligibilidad

El parámetro de la inteligibilidad es uno de los pocos parámetros acústicos que tienen un reflejo directo sobre normativas, ya que afecta a procesos de evacuación y seguridad. De forma complementaria normativas de organismos deportivos como FIFA complementan la definición de dichos requerimientos. Sin embargo, todos estos criterios están íntimamente relacionados con los sistemas electroacústicos de reproducción fijos, su posición y sistemas de retardo, con lo que en espacios de tan grandes dimensiones y enfocándose en espectáculos transitorios con sus propios equipos o eventos audiovisuales, su aplicación es cuando menos cuestionable. No obstante, un recinto con buenos niveles de inteligibilidad suele tener un diseño cuidado.

3.5. Prioridades en los objetivos acústicos

El cambio de paradigma comentado a lo largo del artículo lleva aparejado un cambio en las necesidades y las

sensibilidades de los grandes espacios de representación multipropósito. Estas necesidades han sido condensadas en un formato similar al gráfico de Maslow (Figura 1).



Figura 1. Representación ilustrativa de una pirámide de necesidades acústicas en estadios o recintos multipropósito.

Estas necesidades y su ubicación en la pirámide van desde la necesidad de protección auditiva y el riesgo de efectos permanentes en el sistema auditivo hasta las más altas cotas de exigencia acústica [5]. La formulación de esta pirámide “personalizada” en las fases iniciales del proyecto ayudan significativamente en el alineamiento del equipo de diseño a la hora de alcanzar unos objetivos acústicos óptimos, dentro de las restricciones particulares de cada proyecto.

4. CONCEPTOS NO ACÚSTICOS QUE CONDICIONAN EL DISEÑO ACÚSTICO

Igualmente, dentro de cualquier proyecto de diseño de cualquier espacio multipropósito se establecen una serie de necesidades de operación e incluso de imagen que sin duda condicionan el diseño acústico y que en general buscan objetivos completamente opuestos a los marcados en la acústica clásica. Dentro de estos conceptos se pueden identificar los más usuales como:

4.1. Paisajes sonoros o generación de ambientes

Habitualmente en los estadios y arenas que comparten eventos audiovisuales con eventos de carácter deportivo, uno de los requerimientos más habituales son la creación de ambientes o paisajes sonoros relacionados con los eventos deportivos. Donde se busca que el propio recinto amplifique el efecto de los fans o los aficionados sobre los artistas o los deportistas, creando un ambiente único que sea representativo de la experiencia de asistir a ese recinto. Este fenómeno tan característico requiere medidas en sentido contrario a las adoptadas para generar acústicas óptimas, ya que precisa generar reflexiones adicionales y focalización de la energía sonora sobre el escenario o el terreno de juego mediante reflectores y selección de materiales menos absorbentes. Lo

que puede crear un conflicto de intereses indeseado con otros criterios de acústica óptima para estos grandes recintos.

Existe incluso bibliografía definiendo un parámetro para evaluar un “índice de apoyo de los aficionados” (FSI) [6], [7]

4.2. Imagen del recinto

Al igual que la necesidad de crear ambientes únicos asociados con los recintos, la imagen estética del recinto suele reducir las superficies efectivas para la instalación de materiales y/o geometrías con buenas prestaciones acústicas, eso unido la pobre relación entre superficies útiles y volumen libre de estos grandes recintos condiciona enormemente la consecución de los objetivos acústicos de forma solvente.

Igualmente, la geometría del espacio con formas curvas que favorecen la focalización y las restricciones estructurales y de movimiento de muchas de las cubiertas de este tipo de recintos suponen otra gran limitación a la hora de seleccionar e instalar muchas de las soluciones acústicas convencionales.

Consideraciones similares se podrían realizar sobre los recintos semiabiertos donde las aperturas de las cubiertas introducen efectos adicionales asociados con las condiciones de temperatura, humedad y viento que pueden incrementar aún más la incertidumbre de las predicciones respecto a la respuesta acústica óptima deseada [8]

4.3 Acreditaciones organismos deportivos, retransmisiones de eventos, etc.

Los diferentes eventos que este tipo de grandes recintos multipropósito aspiran a albergar, suelen tener aparejados restricciones adicionales relacionada con los organismos que apadrinan dichos eventos que influyen de forma directa o indirecta sobre las soluciones acústicas operativas (Figura 2). Estas restricciones pueden venir de las productoras, artistas o como en el caso de los encuentros de fútbol de FIFA [9]. Estos pueden establecer especificaciones en cuanto a niveles de potencia generadas, tipos de instalaciones electroacústicas de refuerzo, así como, establecen recomendaciones sobre la reverberación de espacios multipropósitos, respecto a los sistemas electroacústicos fijos del recinto, sobre las condiciones para la iluminación o los puntos de cámara para las retransmisiones que pueden condicionar tanto los acabados como la geometría y disposición de elementos en la cubierta.

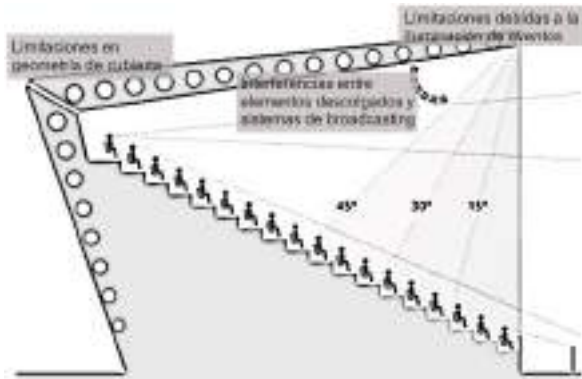


Figura 2. Sección típica de audiencia de estadio identificando algunas de las restricciones no acústicas de cubierta.

4. ESTÁNDARES Y GUÍAS DE DISEÑO

Sin pretender ser una descripción exhaustiva, y con un objetivo meramente ilustrativo se recogen a continuación, los esfuerzos y la evolución de algunos organismos para ayudar en la creación de criterios comunes y guías de diseño unificadas.

Uno de los más conocidos es la publicación de la norma DIN 18041 [10], que realiza una amplia descripción de los tiempos de reverberación recomendados para una larga lista de espacios de uso de la palabra, música y eventos múltiples. Si bien sus recomendaciones están acotadas por el tamaño de los recintos con referencias a volúmenes máximos alrededor de los 30.000 m³ y tiempos de reverberación limitados a 2 segundos, lo que reduce de forma importante el rango de aplicación de sus recomendaciones.

Por otro lado, la mayoría de los estadios o arenas aspiran a poder albergar grandes competiciones futbolísticas y por tanto deben cumplir con los criterios FIFA [9], [11], [12] en lo relativo a tiempos de reverberación (4 seg. en un amplio rango de frecuencias para eventos multipropósito), inteligibilidad del sistema PA/VA ($STI > 0.55$) y la uniformidad del sistema PA/VA (± 3 dB en un amplio rango de frecuencias) [3].

5. REFLEXIONES PARA UN FUTURO DESEABLE

Una vez analizado a grandes rasgos el camino recorrido hasta la fecha y comparando el caso con otros sistemas estandarizados de verificación y valoración multicriterio en diferentes ámbitos (LEED, BREEAM, WELL, etc), parece lógico pensar que la evolución de la disciplina de acústica de salas podría seguir un esquema similar.

Al ritmo que avanza la producción de eventos tanto deportivos como audiovisuales, la técnica y tal y como se consumen estos contenidos, parece razonable que se pudiera evaluar la idoneidad de los recintos existentes y futuros de forma estandarizada. Disponer de una herramienta o metodología que nos permita evaluar y clasificar diferentes

recintos en función de sus capacidades de forma singular, permitiría dar un salto de calidad a dichos espacios y favorecería a la especialización de estos (Figura 3). La base de este tipo de herramienta o estandarización está aún por consensuar, no obstante, debería de basarse en principios firmes y ampliamente aceptados por el sector, entre los cuales deberían considerarse:

- Selección de índices de evaluación y rangos de operación objetivos: Estos conceptos deberían ser acordes tanto a las particularidades de los grandes espacios deportivos y multipropósito, así como, a la diversidad de eventos y espectáculos. Estos podrían ser los descritos en este artículo o cualquiera otro nuevo índice que se adapte a las necesidades del análisis.
- Uniformidad de los criterios: Establecer ámbitos de aplicación diferenciados dentro del mismo recinto, para valorar de forma local el cumplimiento de objetivos específicos. No parece tener sentido caracterizar las condiciones acústicas de un estadio por un valor o curva de referencia de forma global. E incluso que ese índice pudiera evaluarse en función del tipo de evento/representación considerada
- Representación gráfica multicriterio sencilla de interpretar: En aras de conseguir una fácil interpretación y reconocimiento público definir una representación icónica que condense toda la información acústica que se derive de esos cálculos, a modo de sello de calidad que permita representar tanto la acústica de forma global y sectorial (áreas, eventos, parámetros). Este tipo de representaciones multicriterio facilitarían la comparación entre recintos y favorecería la preevaluación acústica de estos recintos tan complejos, permitiendo su comparación de igual a igual, a la vez que identificar el potencial en reformas e incluso en objetivo potencial del proyecto.

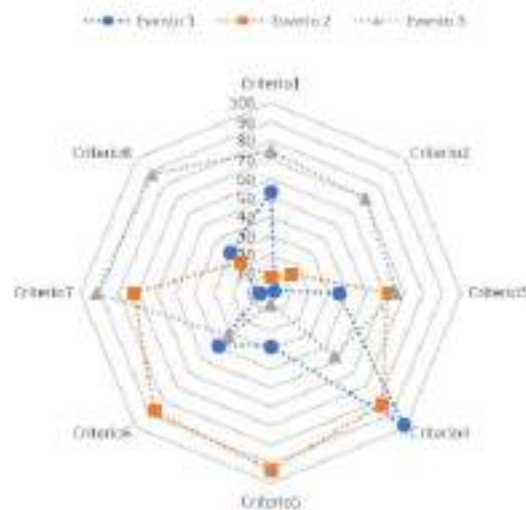


Figura 3. Ejemplo de representación gráfica multicriterio

6. CONCLUSIONES

El mundo de la acústica de salas dentro de recintos como estadios arenas o grandes recintos multipropósito parece que ha avanzado en las últimas décadas de forma desestructurada atacando problemas particulares de cada uno de los recintos sin una visión global y enfocada del problema.

Aspirar a una estandarización en la evaluación acústica de este tipo de recintos supondría una gran evolución en el desarrollo de la disciplina de acústica de salas.

7. REFERENCIAS

- [1] Leo Beranek, Acoustics, 2a. ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 1996.
- [2] M. Eşmebaşı, Z. B. Özyurt, y Z. S. Gül, «CONTEMPORARY SPORTS ARENA ROOM ACOUSTICS DESIGN», 2022.
- [3] A. Peretokin, A. Livshits, A. Orlov, y N. Shirgina, «Acoustics features of sports facilities on the example of FIFA 2018 football stadiums in Russia», en Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, sep. 2019, p. 8.
- [4] Felix Vernersson, «Variable acoustics in multifunctional stadiums», KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2022.
- [5] M. Skålevik, «Music Room Acoustics – Critical Parameters», 2012.
- [6] Kh. A. Shchirzhetskii y A. Peretokin, «Calculation of the Fan Support Index in the Acoustic Design of Large Sports Facilities», Stroitel'nye Materialy, pp. 35-40, ene. 2022, doi: 10.31659/0585-430X-2022-803-6-35-40.
- [7] Rajvi Borad, Prachi Gajjar, Ritika Garud, Siddhi Hindalkar, y Sweta Nair, «Acoustic -Arenas and Stadiums».
- [8] L. Tronchin, «Variability of room acoustic parameters with thermo-hygrometric conditions», Applied Acoustics, vol. 177, jun. 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.107933.
- [9] FIFA, «Football Stadiums Guidelines», FIFA Publications, 2023. <https://publications.fifa.com/en/football-stadiums-guidelines/>
- [10] «DIN 18041:2015-02_Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design», 9 de enero de 2015.
- [11] FIFA, «Football stadiums_5th ed_Technical recommendation and-requirements». 2011.
- [12] V. Milanese, L. Tronchin, y O. Inácio, «Design and analysis of the sound reinforced system for the FIFA world cup 2014 stadium “DUNAS ARENA”, in Natal.», 2014.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

ASL-1 Acústica de recintos históricos.

CONTRASTE METODOLÓGICO E INSTRUMENTAL PARA LA INTERRELACIÓN ENTRE FORMATOS AMBISONICS Y LA NORMA ISO-3382: APLICACIÓN EN LA ACÚSTICA DE RECINTOS HISTÓRICOS SINGULARES

José Benjamín González Gomis^{1*}
Samuel Quintana Gómez²

¹Universidad de Valladolid

²Escuela Politécnica de Cuenca - UCLM

RESUMEN

Los formatos de grabación de audio Ambisonics y la norma ISO-3382 son dos de los grandes estándares de la gestión de la espacialidad del sonido y de la caracterización acústica de recintos. Si la norma ISO-3382 permite cuantificar y comparar esta caracterización, la tecnología Ambisonics logra simular la esfericidad del sonido y convertirla en un parámetro moldeable de la señal de audio. La investigación plantea una experimentación metodológica e instrumental buscando interrelacionar el formato de grabación de tercer orden de Ambisonics con los parámetros contenidos en ISO-3382. Para ello se ha diseñado una metodología de medición que permite una comparación cuantitativa en aspectos subjetivos como la reverberación percibida, el ancho aparente o la envolvente del oyente y la escucha binaural, aplicándose distintas codificaciones de la señal Ambisonics para su interoperabilidad con un mismo programa de análisis acústico. Este método se ha puesto en práctica en la caracterización acústica del recinto histórico de la iglesia de San Pedro (Cuenca), singular por su circularidad. Con ello se pretende tender puentes interdisciplinarios entre la acústica y las nuevas tecnologías de audio 360° navegables, contribuyendo a la sensibilización y la transdisciplinariedad de la comprensión del sonido en el espacio y como espacio.

ABSTRACT

The Ambisonics audio recording formats and the ISO-3382 standard are two of the major standards in the management of sound spatiality and the acoustic characterisation of enclosures. While the ISO-3382 standard makes it possible to quantify and compare this characterisation, the Ambisonics technology is able to simulate the sphericity of sound and convert it into a mouldable parameter of the audio signal. The research proposes a methodological and instrumental experimentation seeking to interrelate the Ambisonics third-order recording format with the parameters contained in ISO-3382. To this end, a measurement methodology has been designed that allows a quantitative comparison in subjective aspects such as perceived reverberation, apparent width or the listener's envelope and binaural listening, applying different encodings of the Ambisonics signal for its interoperability with the same acoustic

analysis programme. This method has been put into practice in the acoustic characterisation of the historic site of the church of San Pedro (Cuenca), which is unique for its circularity. The aim is to build interdisciplinary bridges between acoustics and the new navigable 360° audio technologies, contributing to the awareness and transdisciplinarity of the understanding of sound in space and as space.

Palabras Clave— acústica arquitectónica; acústica de iglesias; espacialización del sonido; formatos de grabación Ambisonics; percepción espacial del sonido.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación nace con ánimo de complementar y actualizar estudios de caracterización acústica en la iglesia de San Pedro, y aportar información cuantitativa sobre la espacialidad del sonido en un recinto con una disposición geométrica singular, caracterizada por su circularidad interna y cúpula [1].

Este estudio se basa en investigaciones y mediciones desarrolladas previamente en el ámbito de la caracterización acústica de recintos, rama de la acústica que no ha dejado de crecer en las últimas décadas. Son muchos los tipos de recintos estudiados, y en función de su tipología se adopta para su estudio alguna de las opciones de la norma ISO-3382 (salas de espectáculos, recintos ordinarios, espacios abiertos) [2]. Los recintos históricos, no cuentan con una estipulación propia dentro de la normativa, sin embargo, son fácilmente adaptables a alguna de las tres, especialmente la dedicada a recintos para espectáculos [3]. Esta forma de aproximarse al patrimonio inmaterial a través de la acústica ha experimentado un gran auge en las últimas décadas. Las tipologías arquitectónicas estudiadas son cada vez más amplias, sin embargo, la acústica de iglesias y otros templos sigue siendo uno de los temas más abordados [4]. En España tres centros se han dedicado con asiduidad a estos estudios: la Universidad Complutense de Madrid, con A. Pedrero a la cabeza [5]; la Universidad de Sevilla, centrada especialmente en las iglesias mudéjares y catedrales andaluzas [6]–[8]; y la Universidad Politécnica de Valencia [9]. En los últimos años, la Escuela Politécnica de Cuenca (Universidad de Castilla-La Mancha), también ha abordado con éxito estudios en este campo

* *Autor de contacto:* jbgonzalezgomis@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

[10]. De especial relevancia para esta investigación es la tesis acústica-performativa defendida por Nelia Valverde Gascuña [1].

La tecnología Ambisonics es una vieja conocida de la industria del audio, pero su crecimiento y divulgación entre muchos sectores basados en el procesado de señal ha sido lento y costoso. Su historia comienza en los años setenta del s. XX, con la invención del formato Ambisonics de primer orden. La base de los formatos ambisónicos se remonta a la técnica XY patentada en 1930, donde la combinación de dos micrófonos con figuras de ocho rotadas en 90° permitía una grabación próxima a la circularidad [11]. En la actualidad, su desarrollo ha permitido llegar hasta formatos ambisónicos de 25°, logrando una gran simulación de esfericidad que se aplica en VR, realidad aumentada, videojuegos, etc. [12].

La norma ISO-3382 y los formatos ambisónicos son dos de los principales estándares en cuanto a estudio del sonido en el espacio se refiere. En esta investigación se pretende unir ambos mundos a partir del estudio de caso de la iglesia de San Pedro. Tiene pues una importante carga experimental, donde se ha desarrollado un método comparativo específico para interrelacionar ambos estándares. Por ello podemos concretar los objetivos en tres líneas principales:

- Establecer una aproximación de los métodos de medida de la espacialidad, entre sistemas de instrumentación estándar (ISO-3382), y nuevos sistemas de grabación ambisónicos comerciales (Zylia ZM-1).
- Cuantificar para los parámetros de espacialidad IACC y JLF, las diferencias obtenidas mediante un sistema de instrumentación basado en ISO-3382 y el sistema Zylia, y establecer su valor respecto al JND del parámetro.
- Mostrar diferencias entre los parámetros de espacialidad debidas a la posición de la fuente, ubicada según contexto litúrgico o funcional en un recinto singularmente circular.

2. SAN PEDRO DE CUENCA: SU SINGULAR ARQUITECTURA CIRCULAR



Figura 1. Exterior de la iglesia de San Pedro obtenido a partir de medición de nube de puntos (LiDAR ZEB Horizon®).

Su origen se remonta al s. XII, y ha estado sometida a numerosas restauraciones, especialmente en el s. XVIII, cuando se contó con José Martín de Aldehuela, quien le dio su actual planta: «circular en su interior y octogonal en el exterior» [1]. San Pedro es una iglesia levantada en el casco histórico de Cuenca (Castilla-La Mancha), en la parte más elevada de la ciudad. Fue una de las primeras en ser construidas tras la definitiva reconquista de la ciudad por Alfonso VIII (1177). Unos años después, se creó la sede episcopal en Cuenca

y se reestructuró el espacio urbano con la construcción de nuevas iglesias [1]. San Pedro es uno de los ejemplos de esta estrategia de la edificación sacra por parte del nuevo poder cristiano.

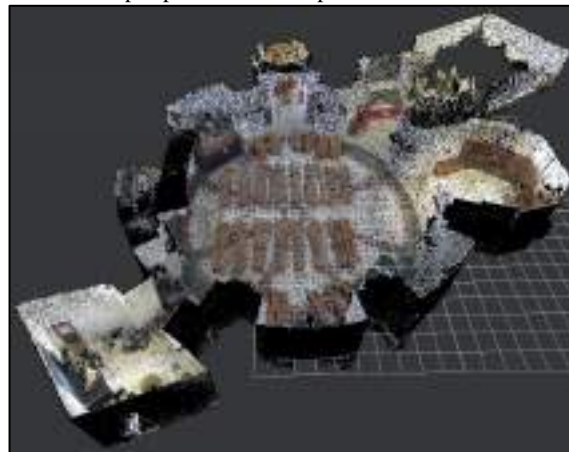


Figura 2. Corte en altura de la iglesia San Pedro.

Los recintos circulares presentan unas características y problemáticas acústicas particulares [13]–[17]. En España estos espacios han sido abordados por autores como Delgado García, Pedrero González o Díaz Sanchidrián, aplicando predicciones acústicas a espacios de significado religioso [18].

3. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPAMIENTO DE MEDIDA



Figura 3. Ejemplo del instrumental de medición en San Pedro.

La metodología de medida se ha establecido en base a la norma ISO-3382, llevándose a cabo dos sesiones de grabación; una sesión en la que se combina el HATS con el sistema comercial Zylia para obtener el parámetro IACC, y una segunda sesión para obtener el parámetro JLF, basada en una configuración pareada de micrófonos (omnidireccional+bidireccional) junto al mencionado sistema comercial Zylia. Se han seleccionado tres puntos de emisión (altar-F1 y central-F2 en planta baja, y coro-F3 en cota +5,40 metros) y 9 puntos receptores distribuidos funcional y estratégicamente en el recinto. Los puntos 1, 3, 5, 7, se encuentran localizados tomando como eje longitudinal la línea que une altar con el coro y a distancias no múltiplos entre ellas; los puntos 2, 4, 6, se sitúan aprovechando la simetría del recinto sobre el área de audiencia del área izquierda de la iglesia (mirando desde el altar), en posiciones que describen

una trayectoria curva desde el interior (zona central) hacia el exterior (zona más próxima a paredes); A1 y C1 corresponden a puntos específicos en las zonas del altar (A1) y capilla (C1) de los Condes de Toreno, con más significación arquitectónica, histórica y patrimonial por haberse construido en una fase previa de la historia de vida del edificio (s. XVI), y conservar su artesanado original [1].

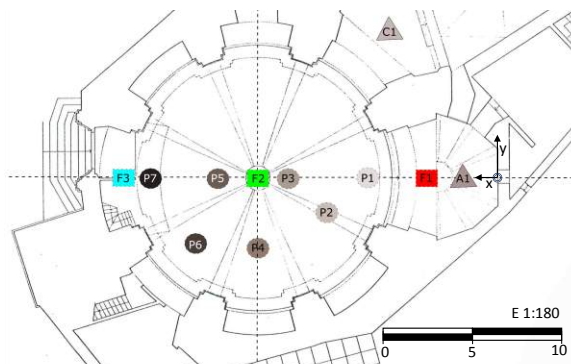


Figura 4. Posiciones de fuentes y receptores seleccionadas.

Tabla 1. Localizaciones de las fuentes y receptores.

Fuente	x (m)	y (m)	z (m)	a F1	a F2	a F3
F1	4,4	0,0	1,5	[-]	9,9	17,4
F2	14,3	0,0	1,5	9,9	[-]	7,4
F3	21,7	0,0	5,4+1,5	17,3	7,4	[-]
A1	1,8	0,0	1,4	2,7	8,1	18,6
C1	5,6	11,0	1,4	9,5	11,3	16,4
P1	7,2	0,0	1,4	2,8	7,1	16,5
P2	10,0	-3,0	1,4	6,0	4,3	11,2
P3	12,8	0,0	1,4	8,34	1,5	8,5
P4	14,3	-5,0	1,4	11,6	5,4	9,0
P5	16,9	0,0	1,4	12,5	2,5	5,1
P6	17,4	-7,0	1,4	15,2	7,1	7,16
P7	19,9	0,0	1,4	15,6	5,6	5,4

Se ha emitido una señal impulsiva generada por globos de grandes dimensiones (>35cm) que, debido al bajo ruido de fondo, permiten conseguir relaciones S/N por encima de 35dB (63Hz a 8kHz). Para cada posición se han emitido tres señales impulsivas promediando su resultado y trabajado en bandas frecuenciales de octava para expresar el valor del parámetro.

El procesamiento de las señales obtenidas mediante el sistema de instrumentación basado en HATS (IACC) y JLF (combinación pareada de micrófonos omni+bid), se ha procesado mediante el mismo software comercial Dirac 7. Para obtener los parámetros de espacialidad (IACC y JLF) a través de Dirac de las señales grabadas mediante el sistema comercial Zylia, se han exportado previamente para poder interoperar. De esta forma, para calcular IACC se ha tomado la señal grabada con Zylia en modo binaural, donde el canal L corresponde al canal 1 y el canal R al canal 2.

Para calcular el parámetro JLF, se ha combinado por un lado la señal de los 19 micrófonos integrados en Zylia para obtener una señal omnidireccional aplicada al canal 1, con una configuración bidireccional en el canal 2. Para minimizar el procesamiento de la señal, se ha empleado un *plugin* de libre distribución (*Ambisonics Tool Kit-ATK*) implementado en el programa de edición de audio Reaper [19]. Este *plugin*, especializado en el procesamiento de señal ambisónica, ha permitido convertir la pista multicanal exportada del Zylia Studio

en una señal mono con patrón microfónico omnidireccional. Una vez obtenido el canal mono, se ha combinado en Dirac con la señal bidireccional, generando así una pista de dos canales que cumplen las especificaciones requeridas por el propio Dirac para el cálculo de JLF. En ambos sistemas se ha aplicado un ajuste de la señal (contraste en cámara reverberante y en campo libre) para equiparar la señal de los dos micrófonos (AT-4050 con distinto patrón) y el procesamiento de las señales (Zylia ZM-1).



Figura 5. Medición en la capilla de los Condes de Toreno (A1).

4. SELECCIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS Y VALORES PROMEDIO

En la Tabla 2 se muestran los valores típicos de parámetros de caracterización promediados en frecuencia de número único obtenidos a través de las señales recogidas por el HATS de las 9 posiciones (incluidas A1 y C1), que sirven de referencia y base para conocer el comportamiento acústico comparativo de la iglesia. Los valores reflejados incluyen además los promedios de las franjas espectrales normativas. 500-1000 Hz para reverberación y claridad y 125-1000 Hz para ASW y LEV.

Tabla 2. Magnitudes analizadas y sus valores promedio.

Aspecto subjetivo	Magnitud	JND	Fuentes			Rango típico
			F1	F2	F3	
Reverb.	EDT; (s)	5%	5,41	5,64	5,63	1,0 – 3,0
	T ₃₀ ; (s)		5,64	5,64	5,64	
Claridad	C ₈₀ ; (dB)	1 dB	-6,3	-4,7	-7,2	-5; +5
	C ₅₀ ; (dB)		-8,8	-6,1	-9,2	
	D ₅₀	0,05	0,16	0,24	0,11	0,3; 0,7
	T _g ; (ms)	10 ms	387	367	414	60; 260
ASW	J _{LIF}	0,05	0,14	0,13	0,20	0,05; 0,35
LEV	IACC _(0,50)	0,075	0,77	0,76	0,66	
	IACC _(0,80)	0,075	0,73	0,72	0,60	
	IACC _(50,+)	0,075	0,49	0,47	0,45	
	IACC _(80,+)	0,075	0,48	0,47	0,46	

La caracterización acústica de la iglesia de San Pedro se ha basado en la normativa ISO-3382, adaptándola mediante la selección de un grupo de parámetros articulados en cuatro grupos de aspectos subjetivos percibidos: reverberación percibida, claridad del sonido, ancho aparente de la fuente (ASW) y envolvente del oyente (LEV). Estos parámetros, mostrados a través de sus valores promedio,

permiten una comprensión acústica rápida del recinto y la comparación directa con auditorios.

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

La relación Impulso/Ruido (INR) lograda permite obtener con garantías valores espectrales de los parámetros dentro del rango de las bandas de 125 a 4kHz, pero se han añadido también las octavas de 63Hz y 8kHz para visualizar el comportamiento. La reverberación se caracteriza por sus elevados valores, con una alta difusión del sonido en el recinto, asociado lógicamente a su geometría circular y superficies curvas, con respuesta máxima en la banda de los 250Hz. Los valores para las magnitudes C50 y C80 son crecientes con la frecuencia desde la banda de media frecuencia (250-500Hz), con rangos muy por encima de los considerados óptimos por la normativa (si bien, debe recordarse que no existe una parte específica de la normativa para acústica de iglesias). La claridad vocal (C50) decrece progresivamente para F2, F1 y F3; de esta forma los mejores resultados de C50 se obtienen para la posición central (F2) y los peores para la posición de fuente en el coro (F3). La definición (D50), se caracteriza por unos resultados donde F2 obtiene los mejores resultados, seguida de F1 y F3. En cualquier caso, los valores son muy bajos (por debajo de 0,5) para todo el rango frecuencial, dictaminando una baja definición que derivará en una inteligibilidad pobre. En cuanto al tiempo central (Ts), los valores son muy superiores a los recomendados para auditorios y con tendencias similares para las tres posiciones de fuente. En este caso F1 y F2 son las que proporcionan los valores y tendencias más bajos.

Los aspectos subjetivos de espacialidad percibida tienen un especial interés para este estudio, dado que son los que permiten una mayor interrelación entre instrumentales al ser el objeto principal de los formatos ambisónicos. La espacialidad es una sensación subjetiva presente en el sonido por el propio comportamiento del sonido en el oyente. ASW y LEV son los principales aspectos con los que se puede estudiar la espacialidad [20]. A través de este aspecto subjetivo se puede percibir «[...] que el sonido llega desde varias direcciones diferentes en contraste con una impresión de todo el sonido alcanzando al auditor a través de una apertura estrecha» [21]. Los dos parámetros que afectan a la sensación de espacialidad son el ancho aparente de la fuente (ASW) y la envolvente del oyente (LEV) [22].

El aspecto subjetivo de LEV ha sido abordado mediante el análisis de cuatro ventanas temporales distintas: (0,50); (0,80); (50,+); (80,+). Las ventanas de integración utilizadas para valorar las reflexiones tempranas IACC (0,50) e IACC (0,80) son las más útiles para encontrar cambios en la espacialidad [23], [24]; en este caso las ventanas de integración relacionadas con el sonido reverberante nos permiten observar claramente diferencias posicionales de fuente o receptor (como demuestran comparativamente las figuras 6 y 7).

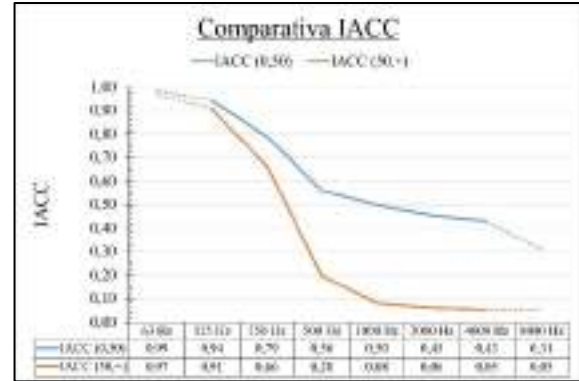


Figura 6. Comparativa de dos ventanas temporales de IACC.

Si individualizamos por fuentes, y como se observa en la figura 9, F3 es la que significativamente produce una mayor sensación de impresión espacial, diferenciándose claramente de las posiciones F1 y F2, principalmente a partir de la banda de 250Hz. Las mayores diferencias se producen en la zona de alta frecuencia (1-4kHz), lo que puede llevar a pensar en una menor difusión del sonido desde F3, provocada tanto por la posición elevada respecto al área de audiencia como por una menor eficiencia de superficies y geometrías de pequeñas dimensiones (>50cm) desde esta posición. Por el contrario, a través de IACC (0,50) no se aprecian diferencias de espacialidad provocadas por cambios posicionales entre F1 (altar) y F2 (central), provocando éstas un sonido más monoaural que F3 (coro). Esto puede resultar óptimo para reforzar la idea de que la posición elevada del coro, provocaría en los oyentes una mayor sensación de espacialidad, que podría combinarse con la liturgia, bien musical o vocalmente [25].

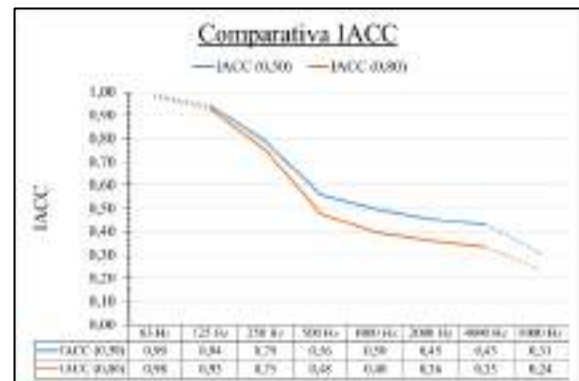


Figura 7. Comparativa entre IACC (0,50) y (0,80) para el promedio general de las tres fuentes.

Si utilizamos una ventana temporal mayor IACC (0,80) se aprecia el mismo efecto sobre la espacialidad que con IACC (0,50), de forma que F3, es la que provoca una mayor sensación de espacialidad. Aunque las tendencias son similares en ambos, la ventana (0,80) provoca en la zona de media y alta frecuencia (>500Hz) valores menores para IACC (0,80) que para IACC (0,50), lo que podría reforzar la hipótesis de que se obtendría una mayor sensación de espacialidad para música que para voz/canto.

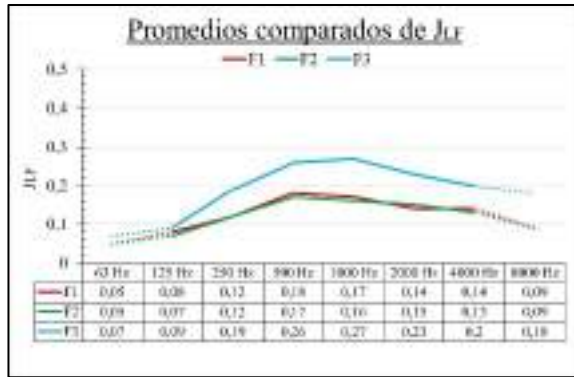


Figura 8. Promedios comparados de JLF para F1, F2 y F3.

Los resultados arrojados a través de la magnitud de fracción de energía lateral precoz (JLF), confirman que F3 provoca una mayor sensación de envolvente en el oyente, que percibe subjetivamente un mayor ancho aparente de fuente sonora marcadamente a partir de media frecuencia (500-1kHz). Las posiciones de fuente F1 y F3 no provocan en promedio diferencias sustanciales. Curiosamente, si tenemos en cuenta la geometría circular del recinto y la gran densidad de superficies curvas, los valores de JLF, están por debajo del rango típico para auditorios (0,3 a 0,7), lo que se podría asociar a una pérdida de localización y dirección principal del sonido en el oyente fruto de la circularidad geométrica del recinto.

Los resultados anteriores están basados en el análisis promedio de las posiciones de fuente sonora, pero si realizamos un análisis pormenorizado entre las posiciones de emisión y recepción, podemos obtener características singulares del recinto, asociadas a su geometría y/o combinación posicional fuente-receptor.

El parámetro IACC (0,50) es el que nos ha dado mejores resultados para encontrar diferencias posicionales. En él se aprecia claramente que, para cualquiera de las posiciones de fuente, el punto P6 (próximo a una capilla a través de la que se accede a la torre y donde se encuentra la pila bautismal), tiene un menor valor sobre el resto y especialmente para la banda de frecuencia de 500Hz, donde se produciría un aumento de la espacialidad (sonido poco monofónico/deslocalizado). Este efecto se aprecia más claramente cuando la fuente está en F1 y F2 (figura 9).

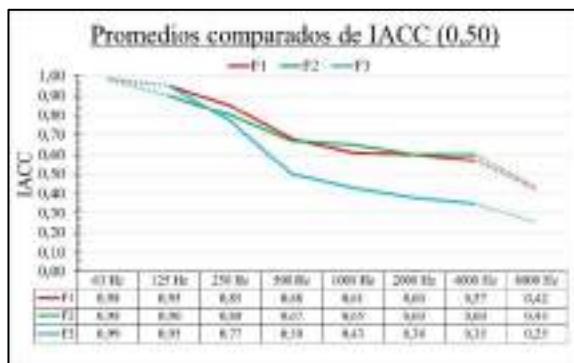


Figura 9. Promedios comparados de IACC (0,50) para F1, F2 y F3.

Asimismo, se observa una clara diferencia entre los puntos impares, ubicados a lo largo del eje longitudinal “altar-coro” (1, 3, 5, 7), con un mayor coeficiente (menor espacialidad), respecto a los puntos pares (2, 4, 6), con un menor valor (mayor espacialidad),

localizados fuera del eje y siguiendo una línea curva hacia el exterior. Es decir, los puntos receptores fuera de una amplia franja central del eje altar-coro tendrían una menor sensación de espacialidad que los próximos al perímetro de la geometría circular de la iglesia y próximos a las superficies y accesos a las capillas laterales. Este efecto es más presente para F1 y F2 situados prácticamente a la misma altura de los puntos receptores.



Figura 10. Promedios comparados de JLF en el eje y fuera del eje para F1, F2 y F3.

Respecto a los puntos especiales ubicados dentro del altar o de la capilla de los Condes de Toreno, tanto a través de IACC como JLF, se observan los mismos efectos, produciéndose en ellos una mayor sensación de espacialidad que para el resto de las posiciones. Esto puede explicarse por una menor incidencia de la cúpula central sobre estos puntos, alejados del perímetro circular principal y donde se produce un acoplamiento acústico entre el volumen principal y el secundario de la capilla o altar. Ese hecho se ve reforzado en los resultados que se aprecian en la combinación F2-C1, donde la posición central de F2 produce visión directa del receptor sobre la C1 (es la combinación que tiene menor espacialidad).

Una vez realizada la caracterización general de San Pedro, con especial atención a los aspectos espaciales subjetivos, se ha procedido a la comparación contrastada con el sistema Zylia. Para ello se ha trabajado especialmente con las ventanas temporales de IACC más relevantes para este caso: (0,50) y (0,80).

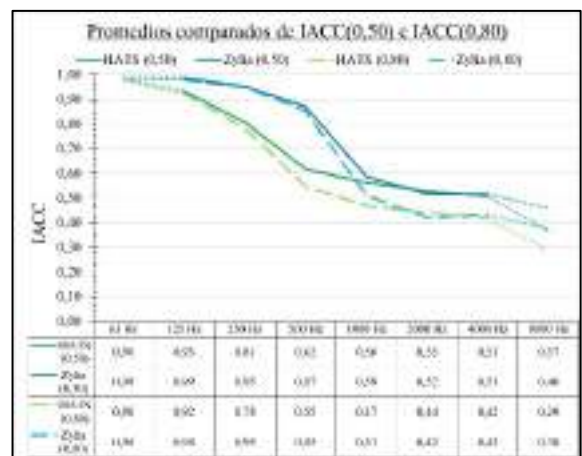


Figura 11. Promedios comparados de IACC (0,50) e IACC (0,80) en ambos sistemas.

En la figura 11 puede apreciarse como el sistema Zylia ZM-1 ofrece unos valores próximos a los obtenidos mediante el sistema HATS. Si bien los valores no coinciden plenamente, el comportamiento de las gráficas es bastante similar, especialmente en baja frecuencia, donde la tendencia de ambas gráficas se mantiene dentro de los valores de la JND, presentando en cambio una diferencia más notable en media y alta frecuencia a partir de los 500Hz derivada probablemente de la propia antropometría del sistema HATS. Ambos sistemas muestran una caracterización del recinto acorde al comportamiento habitual de este parámetro, con una mayor sensación envolvente en bajas frecuencias que desciende paulatinamente hacia una percepción más localizada a medida que aumenta la frecuencia.

La misma comparación aplicada a JLF ofrece un resultado con algunas características comunes al anterior parámetro, con una mayor proximidad en altas frecuencias y unos valores fuera del rango de JND principalmente en media frecuencias (125Hz a 1kHz). Más allá de los valores cuantificados, sin duda influidos por el diferente diseño instrumental y necesidad de un *plugin* (ATK) aplicado para su interoperabilidad, resulta interesante constatar cómo ambos sistemas ofrecen una caracterización de San Pedro para JLF que rompe con el comportamiento habitual del parámetro (aumenta sus valores con la frecuencia) y resulta más bajo de lo que se podría esperar para un recinto circular en relación con el rango típico. En este caso, su arquitectura circular lleva a establecer un pico para JLF en media frecuencia, que desciende paulatinamente desde los 250-500 Hz hasta los 8000Hz según el sistema de medida.

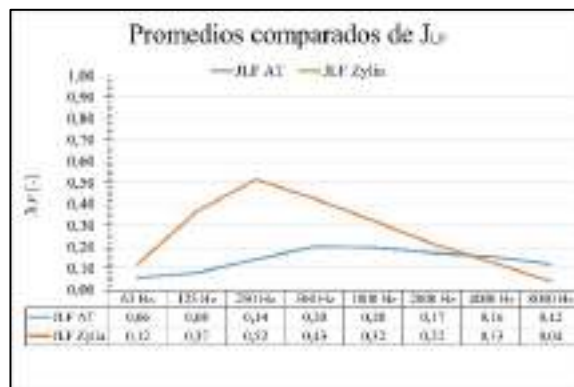


Figura 12. Promedios comparados de JLF con ambos sistemas.

6. CONCLUSIONES

El procedimiento de medida realizado ha permitido caracterizar acústicamente el recinto incidiendo especialmente en los aspectos subjetivos espaciales. Se ha logrado un contraste instrumental que ha permitido estipular unos cauces de interoperabilidad entre la norma ISO-3382 de caracterización acústica y el estándar de grabación ambisónica mediante el sistema comercial Zylia. La cuantificación de los parámetros IACC y JLF ha permitido comprender mejor las diferencias entre ambos sistemas. En el caso de la envolvente del oyente, la equiparación instrumental ha permitido una comprobación del sistema, que, si bien no alcanza los estándares normativos, sí que ofrece una comprensión del comportamiento espacial del recinto que puede ser confiable para la práctica performativa musical. La homologación sistémica total únicamente podría haberse dado en el caso de que todos los valores fuesen menores que la JND correspondiente. En el caso del ancho

aparente de la fuente (ASW), ocurre algo similar. Las tendencias pueden ser equiparables, pero la diferencia de los valores ha resultado mayor, con toda probabilidad por los algoritmos de procesado de señal internos del sistema, y, en menor medida, por la necesidad de aplicar un paso intermedio de procesado de señal para su inclusión en el programa DIRAC; nuevamente podemos hablar de equiparación. En definitiva, el uso del sistema comercial ambisónico Zylia ha resultado efectivo para una comprensión aproximada del comportamiento espacial del sonido, que puede redundar en un amplio diálogo con músicas actuales que valoran especialmente el aspecto espacial (música electroacústica, acústica, instalación sonora, etc.), dando pie a un uso informado de las características sonoras y espaciales del recinto. Por ello, creemos que puede ser especialmente válido en aquellos contextos sonoros donde para la comprensión acústica del espacio se prioricen las tendencias y los comportamientos en el espectro, frente al cumplimiento de unos valores estipulados normativamente. El empleo del sistema ambisónico en contextos artísticos puede favorecer la sensibilidad a las características espaciales y la adecuación de instrumentistas y ensembles a los distintos recintos en los que realicen sus actividades, aportando información sensible y práctica para la ecualización y los ajustes de la señal procedente del equipo de sonido.

Por otro lado, la selección de tres fuentes de emisión tan distintas como el altar, la posición central de la nave circular, y el coro elevado, ha permitido generar representatividad litúrgica y de los usos sonoros del recinto, y constatar las importantes diferencias de comportamiento en función de la ubicación. Con ello se pone en valor la importancia y lo decisivo que resulta en el resultado final una elección meditada, responsable de los puntos de emisión y recepción en base a las características culturales del edificio histórico analizado.

7. REFERENCIAS

- [1] N. Valverde Gascuña, “Sonidos en la Arquitectura de San Pedro. Un estudio acústico desde la perspectiva técnica y artística de la creación sonora en la Iglesia de San Pedro en Cuenca (España),” Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca, España, 2009.
- [2] I. I. O. for Standardization, *ISO 3382 - Acoustics- Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters*, vol. 1997. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [3] F. Martellotta, E. Cirillo, A. Carbonari, and P. Ricciardi, “Guidelines for acoustical measurements in churches,” *Appl. Acoust.*, vol. 70, pp. 378–388, 2009, doi: 10.1016/j.apacoust.2008.04.004.
- [4] S. Girón, L. Álvarez-Morales, and T. Zamarreño, “Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research,” *J. Sound Vib.*, vol. 411, pp. 378–408, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.09.015>.
- [5] A. Pedrero González, “Restauración virtual del patrimonio sonoro. Aplicación al antiguo rito hispánico,” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [6] J. J. Sendra Salas and J. Navarro Casas, *La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias del paleocristiano al tardobarroco*. Sevilla, España: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 1997.

- [7] T. Zamarreño García, S. Girón Borrero, M. Galindo del Pozo, and R. C. Suárez Medina, “La acústica de las catedrales andaluzas: un proyecto I+D interdisciplinar para la recuperación del patrimonio cultural,” in *4ª Jornadas Internacional sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo*, Valencia: General de Ediciones de Arquitectura, 2011, pp. 1–16.
- [8] C. L. Álvarez Morales, “Acústica de grandes espacios de culto,” Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
- [9] A. Planells Pérez, “La acústica virtual en el estudio del patrimonio arquitectónico de la Basílica de Santa María y el Misteri d’Elx,” Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2017.
- [10] S. Quintana, M. D. Fernandez, and M. Machimbarrena, “The Circus-Theater of Albacete: Acoustic characterization and analysis of its double stage configuration,” *Appl. Acoust.*, vol. 189, p. 108574, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108574.
- [11] F. Zotter and M. Frank, *Ambisonics. A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [12] E. Pfanzagl-Cardone, *The Art and Science of 3D Audio Recording*. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland AG, 2023.
- [13] M. L. S. Vercammen, “Reflection of sound by concave surfaces,” in *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, 2010.
- [14] M. L. S. Vercammen, “Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation,” *Acta Acust.*, vol. 96, 2010.
- [15] J. H. Rindel, “Attenuation of Sound Reflections from Curved Surfaces,” in *Proceedings of 24th Conf. on Acoustics*, 1985, pp. 194–197.
- [16] H. Kuttruff, “Some remarks on the simulation of sound reflection from curved walls,” *Acustica*, vol. 77, p. 176, 1993.
- [17] Y. Yamada and T. Hidaka, “Reflection of a spherical wave by acoustically hard, concave cylindrical walls based on the tangential plane approximation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 118, no. 2, 2005.
- [18] E. M. Delgado García, A. Delgado García, A. Pedrero González, and C. Díaz Sanchidrián, “Estudio acústico de la cripta del hospital de San Juan Bautista de Toledo,” in *Tecniacústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica. Encuentro Ibérico de Acústica. European Symposium on Underwater Acoustics Applications. European Symposium on Sustainable Building Acoustics - A Coruña, 3 - 6, Octubre, 2017*, 2017, pp. 1241–1248.
- [19] T. Lossius and J. Anderson, “ATK Reaper: The Ambisonic Toolkit as JSFZ plugins,” *Ideas Sónicas/Sonic Ideas*, vol. 8, no. 16, pp. 20–31, 2016.
- [20] T. Okano, L. L. Beranek, and T. Hidaka, “Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCe), lateral fraction (LFe), and apparent source width (ASW) in concert halls,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, no. 1, pp. 255–265, 1998.
- [21] T. D. Rossing, Ed., *Springer Handbook of Acoustics*. Nueva York, Estados Unidos de América: Springer, 2007.
- [22] S. Girón Borrero, M. Galindo del Pozo, and T. Zamarreño García, “Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches,” *J. Sound Vib.*, vol. 315, pp. 1125–1142, 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2008.02.014.
- [23] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 1998.
- [24] Y. Ando, *Auditory and Visual Sensations*. Nueva York: Springer, 2009.
- [25] A. Alonso, R. Suárez, and J. J. Sendra, “Acoustical influence of different locations of the choir in the cathedral of Granada from a subjective and objective overview,” in *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics*, 2016, p. 8.

LA ACÚSTICA DE LOS REALES TEATROS DE CARLOS III: EL ESCORIAL Y ARANJUEZ

*Juan José Gómez Alfageme**, Clara Arribas Bonilla; Elena Blanco Martín,
María Alonso García; Irene Sánchez Gass

GAMMA - Universidad Politécnica de Madrid – c/ Nikola Tesla s/n – 28031 - Madrid

RESUMEN

Carlos III, durante su reinado, mandó construir los conocidos como Teatros de la Corte entre los que se encuentran el de El Escorial y Aranjuez; gemelos en sus inicios pero muy distintos en la actualidad, debido al incendio que asoló al segundo de ellos a principios de los 2000 y que obligó a una reconstrucción total del teatro. Si bien se trató de mantener su esencia original, se realizaron ampliaciones tanto en la sala como, sobre todo, en la caja escénica, que hacen que ambos teatros ya solo sean parecidos de forma visual. Por esta razón, en el presente artículo, se realiza un estudio acústico de ambos teatros, tal y como se encuentran en la actualidad. Asimismo, y gracias a los modelos geométricos validados de los dos espacios, se podrá analizar el comportamiento de las salas en distintas configuraciones. Finalmente, se propone una reconstrucción del Teatro Real Carlos III de Aranjuez, partiendo de las características constructivas de la sala actual e intentando utilizar los elementos originales del Real Coliseo Carlos III de El Escorial, para entender el comportamiento que pudo presentar con anterioridad al incendio.

ABSTRACT

King Charles III, during his reign, order to raise up the so known as Teatros de la Corte, among which are those of El Escorial and Aranjuez; identical in their beginnings but very different in the current days, due to a fire that ravaged the latter during the early 2000s and forced a total reconstruction of the theatre. Even though the original essence was tried to be kept, extensions were made both in the hall and, above all, in the stage box, leading both theatres to be only visually similar. Therefore, in this article, it is carried out an acoustic study of both theatres, just as how they can be found now-a-days. Likewise, and thanks to the validated geometric models of the spaces, it will be possible to analyse the behaviour of the halls in different configurations. Finally, it is proposed a reconstruction of the theatre Real Carlos III of Aranjuez, starting from the constructive characteristics of the current hall and trying to use the original elements of the theatre Real Coliseo of El Escorial, so that it can be understood the behaviour it could have had before the fire.

Palabras Clave— teatros reales, modelos geométricos, calibración de modelos, acústica virtual.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta la llegada de los Borbones la actividad teatral se había desarrollado en España en locales improvisados, en entarimados en las plazas o en patios de casas particulares (corrales de comedias). Consciente de esta carencia, la corte borbónica, muy aficionada a este entretenimiento, se propuso dotar a los Reales Sitios de locales destinados a teatros permanentes aptos para recibir a las compañías de comediantes italianas y francesas. Durante el reinado de Carlos III (1716 – 1788), se llevaron a cabo numerosas reformas en el plano urbanístico, económico, social y cultural. De entre estos cambios, se impulsó la renovación de numerosos espacios para acercar la arquitectura española a la existente en Europa y, es por ello, que los teatros experimentaron una transformación total, al ser sumamente importantes en el entretenimiento tanto de la Corte como del pueblo.

De esta forma aparecieron los Teatros de la Corte, contruidos en El Escorial, Aranjuez y El Pardo, unidos a las Compañías de los Reales Sitios quienes no solo se ocupaban de realizar las representaciones, sino que también establecieron normas que regían aspectos de las mismas como son el vestuario durante las actuaciones, la dicción de los actores y restricciones del comportamiento público en las representaciones.

Reinando Carlos III, entre los años 1768 y 1774, el arquitecto francés Jaime Marquet realiza tres de los teatros de la Corte, los de los Reales Sitios de Aranjuez, San Lorenzo de El Escorial y El Pardo. En los tres adopta un modelo estandarizado, que parte de los planteamientos que responden a la concepción clásica utilizada por el teatro italiano.

El primer teatro en ser construido fue el del Real Sitio de Aranjuez. En 1768 comienza la construcción en una zona aledaña al Palacio Real de Aranjuez, donde ya había existido anteriormente otro teatro del que no se conservan restos en la actualidad. En 1769 se inaugura el Real Teatro Carlos III, con una capacidad unas 500 personas. El edificio presenta planta rectangular, con eje axial y albergaba una sala en forma de

* **Autor de contacto:** juanjose.gomez.alfageme@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

«U». Estaba dividido en cuatro plantas: platea, palcos, anfiteatro y alta, y contaba también con un escenario y dos salas de tertulia. Allí se representaron durante años óperas, comedias y dramas hasta que en 1777 se liquidó la Compañía de los Reales Sitios. y las representaciones cesaron. Abrió de nuevo sus puertas en 2014 recuperando los elementos originales que se habían conservado. Está considerado como el teatro cubierto mas antiguo de España.



Figura 1. Real Teatro Carlos III de Aranjuez

El segundo teatro que construye Marquet es el Real Coliseo de San Lorenzo de El Escorial. Las obras comienzan en 1770 y tan solo un año después se realizó la inauguración. El edificio histórico tiene planta rectangular con eje axial actuando la sala como elemento estructurante del conjunto teatral. Esta tiene forma de «U» y ella abre el amplio cuerpo del escenario, de planta rectangular, donde se conservan los peines originales del siglo XVIII. Posee dos niveles de palcos sobre los existentes en la planta baja y entre estos últimos y la plataforma de la planta, hay además un nivel intermedio de asientos corridos. Este espacio, pese a adquirir mucha importancia durante el reinado de Carlos III y su hijo Carlos IV para representaciones dirigidas a todas las clases sociales hasta la Guerra de la Independencia. A partir de 2010 este teatro abrió sus puertas de forma definitiva y continúa llevando a cabo la función para la cual fue construido e ideado en 1770. Se le considera como el teatro cubierto mas antiguo de España que sigue en funcionamiento manteniendo su estructura original.



Figura 2. Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial

El tercer teatro que se encargó a Marquet fue el del Real Sitio del Pardo, que se construyó entre 1773 y 1774. El recinto se diseñó como los denominados “teatros de corte”, tenía forma rectangular, una sola planta y con un aforo menor. Desgraciadamente de este Teatro no queda nada más que la boca del escenario y un proscenio muy reducido. [1]

2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y ESTUDIO ACÚSTICO DE LOS TEATROS

El Teatro Real Coliseo Carlos III de San Lorenzo de El Escorial tiene unas dimensiones de sala de 15,80 m de longitud, 14,50 m de anchura y 8.80 metros de altura, Está distribuido en tres plantas (platea con palcos, primera planta con palcos y segunda planta con bancos corridos). Tiene un aforo máximo de 500 personas. La caja tiene unas dimensiones de 9.80 m de profundidad, 17.20 m de anchura y 13.40 m de altura máxima (7,70 m al peine); la boca del escenario tiene 7.40 m de ancho y 4.30 m de alto; el suelo presenta una inclinación de 5°. Dispone de foso de orquesta con cierre. El volumen del teatro es de 2890 m³ y la superficie total de absorción es de 2550 m².

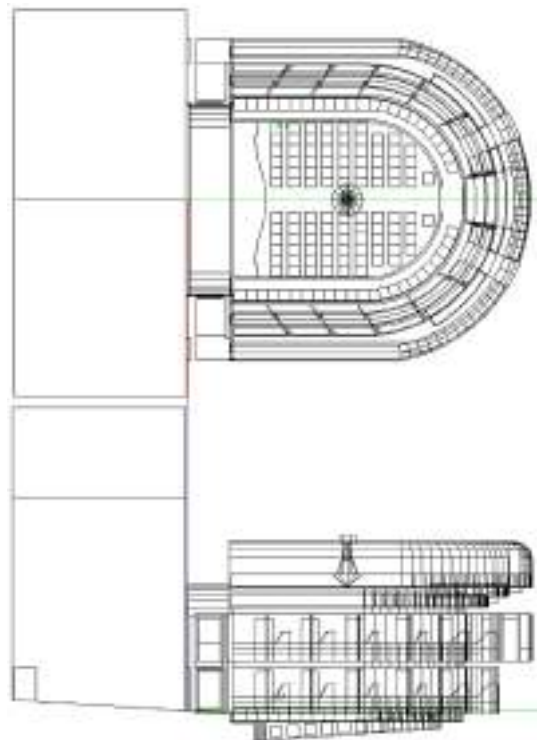


Figura 3. Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial(planta, alzado y vista de sala)

El Real Teatro Carlos III de Aranjuez tiene unas dimensiones de sala de 17.40 m de longitud, 17.20 m de anchura y 9.90 metros de altura, Está distribuido en tres

plantas (platea con palcos, primera planta con palcos y segunda planta con butacas). Tiene un aforo máximo de 380 personas. La caja tiene unas dimensiones de 10.70 m de profundidad, 19.80 m de anchura y 16.30 m de altura máxima (9.80 m al peine); la boca del escenario tiene 9.00 m de ancho y 5.00 m de alto; el suelo presenta una inclinación de 0°. Dispone de foso de orquesta abierto con una altura de 2.55 m. El volumen del teatro es de 4112 m³ y la superficie total de absorción es de 4004 m².

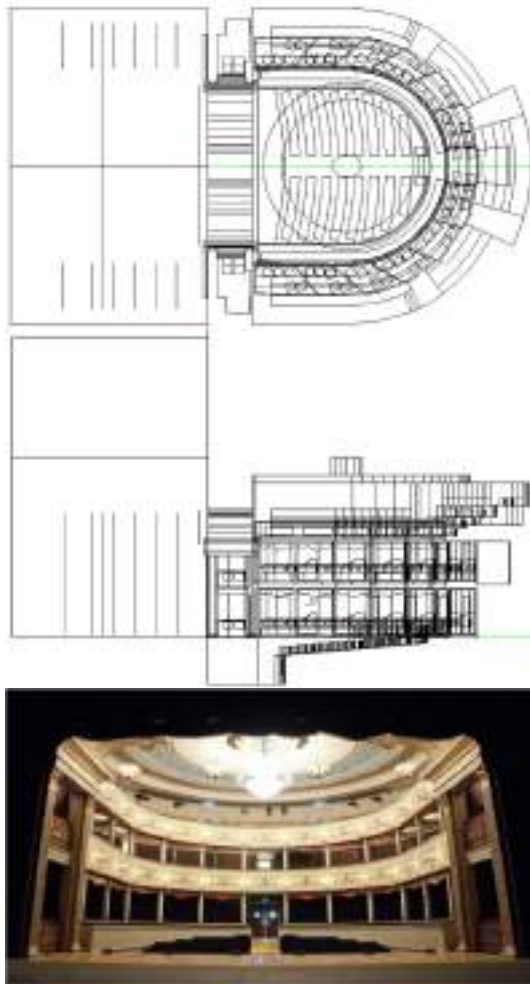


Figura 4. Real Teatro Carlos III de Aranjuez (planta, alzado y vista de sala)

La diferencia de volúmenes entre los dos teatros se debe a la caja escénica del Aranjuez después de su reconstrucción. Se sabe que en el momento de sus construcción los dos teatros tenían dimensiones similares, pues la petición del rey Carlos III al arquitecto Marquet fue la de tener dos teatros idénticos en los Reales Sitios.

Las medidas in situ fueron tomadas en el teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial en febrero de 2021. En la medición se colocaron dos posiciones de fuentes sonoras en el escenario y 25 posiciones de micrófono, distribuidas por las diferentes zonas de audiencia. Las medidas in situ en el

Teatro Real Carlos III de Aranjuez se tomaron en abril de 2021. En la medición se colocaron dos posiciones de fuentes sonoras en el escenario y 28 posiciones de micrófono, distribuidas por las diferentes zonas de audiencia.

En ambos casos cumpliendo con lo establecido en la norma UNE-EN ISO 3382-1 [2]. Se empleó el método de la respuesta al impulso y se utilizó como señal de excitación un barrido de tonos exponencial de 20 Hz a 20 kHz con duración de 5.16 s. Se realizaron dos mediciones por cada posición de fuente-micrófono. Se obtuvieron un total de 12 parámetros acústicos (EDT, T20, T30, RT, C50, C80, D50, Ts, LF, LFC, STI, AICons).

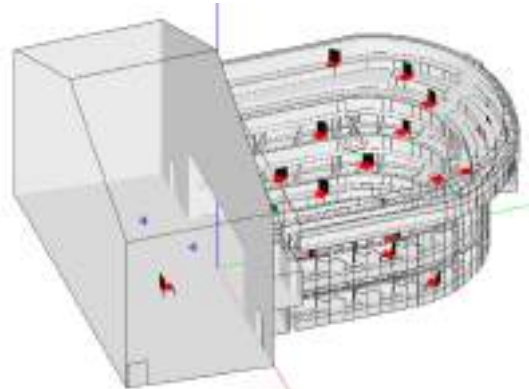


Figura 5. Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial (posiciones de fuentes-2- y micrófonos-25-)

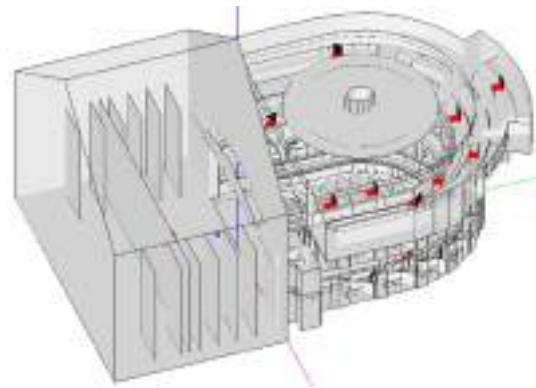


Figura 6. Real Teatro Carlos III de Aranjuez (posiciones de fuentes-2- y micrófonos-28-)

Tabla 1. Valores unitarios de los parámetros acústicos obtenidos de las medidas in situ

Parámetro	El Escorial	Aranjuez
EDT [s]	0.54	1.03
T20 [s]	0.59	1.14
T30 [s]	0.58	1.17
C50 [dB]	5.47	1.17
C80 [dB]	9.02	4.01
D50 [-]	0.76	0.56
Ts [ms]	35.90	66.86
LF [-]	0.07	0.10
STI [-]	0.82	0.63
AICons [%]	2.00	5.80

3. DISEÑO DE LOS MODELOS TRIDEMSIONALES

A partir de los planos en AutoCAD que nos proporcionaron las direcciones técnicas de los teatros: planos de distintas secciones de las plantas, planos de la sección transversal y planos de la sección longitudinal; se comienza a seleccionar las capas y zonas de los mismos que van a ser necesarias para el diseño del modelo arquitectónico simplificado en SketchUp. Para realizar el modelo se modeló una planta cada vez, de este modo se fueron utilizando los planos de AutoCAD de sección de planta uno por uno, ascendiendo por altura. Además, cabe destacar que para simplificar la construcción del modelo se tomaron las salas como simétricas respecto del eje longitudinal y por ello solo se fue modelando una primera mitad que al finalizar se duplicará para obtener las salas completas.

Las principales simplificaciones de la estructura corresponden con todos los elementos curvos del teatro, que se discretizan por segmentos rectos. Se modifican los elementos internos de la sala con el mismo fin, obtener un modelo sencillo y con el menor número de caras posibles. Una de estas simplificaciones se observa en las barandillas de la sala, quedando definidas solo mediante la cara orientada hacia el escenario. Otra simplificación se ha realizado en el diseño de las butacas y de las sillas de los palcos como prismas rectangulares.

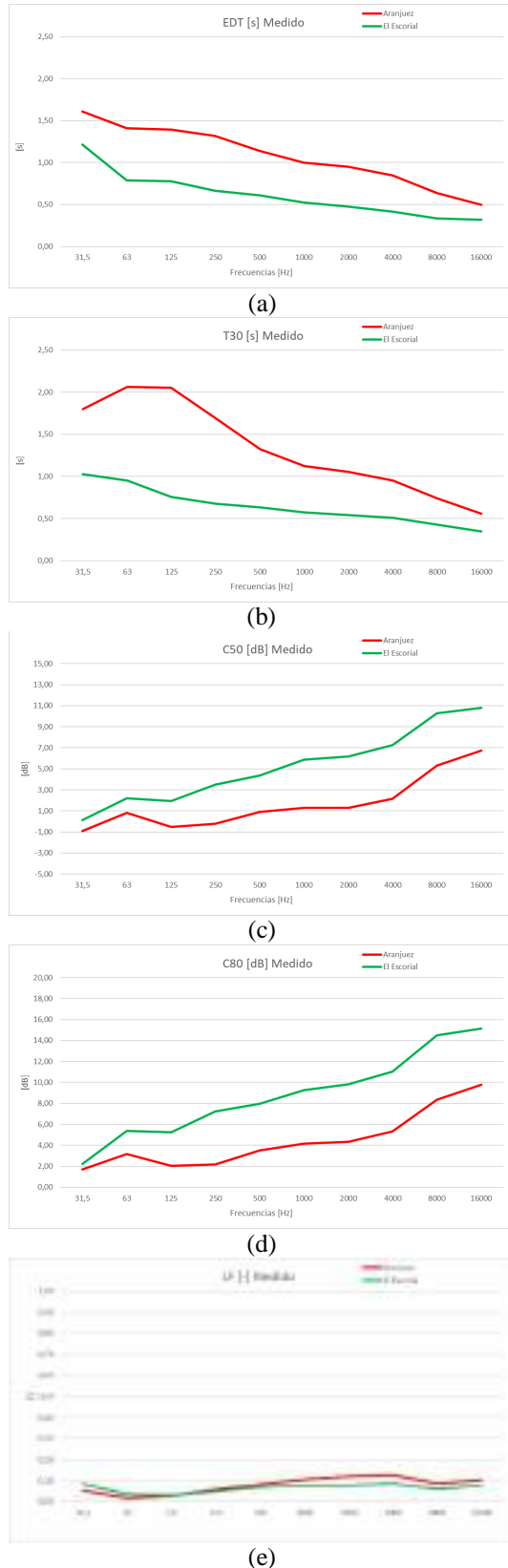


Figura 7. Comparación de parámetros (a) EDT; (b) T30; (c) C50; (d) C80; (e) LF

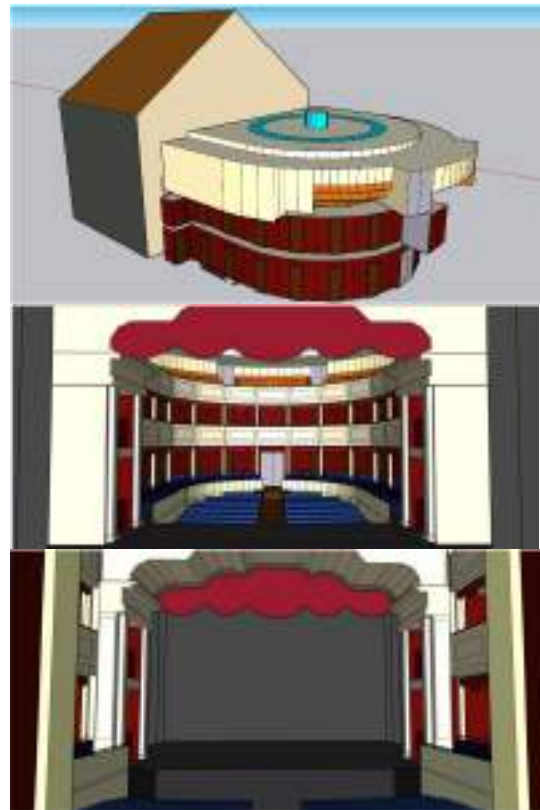


Figura 8. Modelo 3D del Real Teatro Carlos III de Aran juez

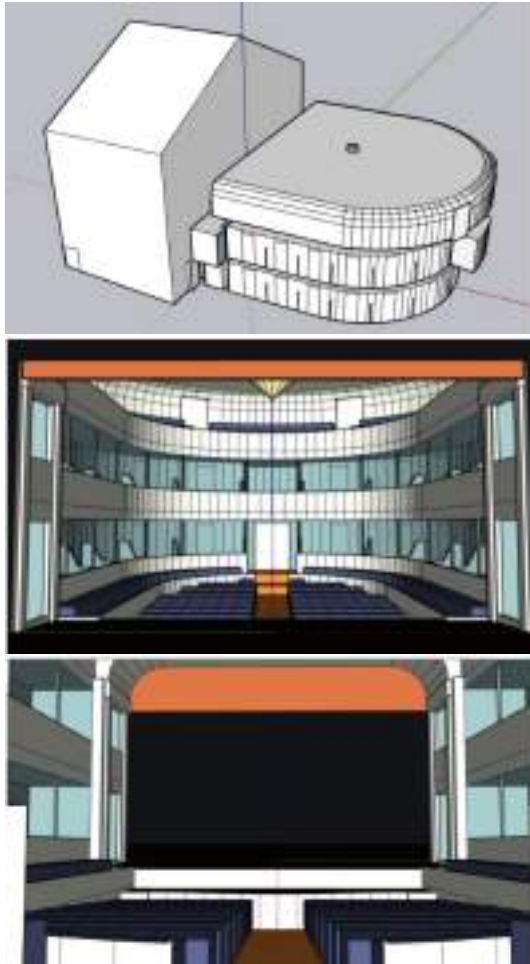


Figura 9. Modelo 3D del Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial

4. MODELOS GEOMÉTRICOS

Una vez acabado el modelo arquitectónico simplificado, debemos de importarlo al software EASE y de este modo obtener el modelo geométrico. Los pasos a seguir para importar el modelo y resolver los posibles errores que se cometieron en el diseño fueron los siguientes: primero, en SketchUp se debe seleccionar todo el modelo en tres dimensiones y asignarlo a un grupo; segundo, importar el modelo arquitectónico al software EASE, para ello debemos de seleccionar un material distinto para cada capa y de este modo obtener el modelo geométrico; tercero, detectar la presencia de “agujeros” en la sala mediante la herramienta “Check Holes” de EASE; ejecutar un trazado de rayos y comprobar que ninguno de ellos sale de la sala

Una vez importado el modelo arquitectónico simplificado al software de simulación acústica EASE, debemos de realizar la elección de los materiales para obtener el modelo geométrico final. Como se ha explicado anteriormente se debe de seleccionar un material distinto por cada capa creada en el software SketchUp. Los materiales fueron escogidos

entre bases de datos de materiales genéricos a partir de sus coeficientes de absorción y para ello fue necesario evaluar cada una de las capas para determinar el material real que se encuentra en la sala.

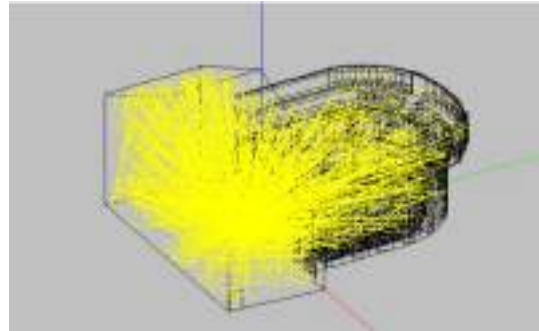


Figura 10. Comprobación mediante *Ray Tracing* del modelo geométrico del Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial

Wall Material	Used	Description
01 a = 10%	Yes	10% Sound Absorbing
110 placa escayola GYPERD 1,2, Full	Yes	Placa escayola 1/2 DR/WALL
120 barandilla escayola 1	Yes	Barandilla escayola 1Gypsum board, 12.5mm thick mount...
120+1 barandilla escayola 1 + scatt 1	Yes	Barandilla escayola 1Gypsum board, 12.5mm thick mount...
120+2 barandilla escayola 1 + scatt 2	Yes	barandilla escayola 1Gypsum board, 12.5mm thick mount...
13_3 250KHZ PANEL Resonator, Full	Yes	250 Hz Helmholtz Resonator w/10cm incremento de abs...
200 Door, Hollow Core, Wood, Generic	Yes	Door, Hollow Core, Wood Octave Data: 125Hz-4KHz...
205+ cristal lampara Glass, Window, Ordinary, Single Strength, Generic + scatt	Yes	Glass, window, single strength Octave Data: 125Hz-4K...
20_2 Concrete or Cinder Block, Smooth Face, Generic	Yes	Cinder or Concrete blocks, smooth surface, unpainted ab...
23 Revoque de cemento	Yes	Revoque de cemento
26_14 Concrete or Cinder Block rough Face, Generic	Yes	Cinder or Concrete blocks, rough surface, unpainted abo...
31 Butaca tapizada terciopelo	Yes	Butaca tapizada terciopelo
33+ butaca terciopelo 3 + scatt	Yes	butaca de terciopelo alta absorción SEATS UNOCCUP...
40 moqueta CARPET CDMM, Full	Yes	COMMERCIAL GRADE CARPET
59 Tejido de terciopelo 650	Yes	Tejido de terciopelo 650
70 Revestimiento de madera 2	Yes	Revestimiento de madera 2May baja absorción
71 Revestimiento de madera 2	Yes	Revestimiento de madera 2Baja absorción
72 Revestimiento de madera ligero	Yes	Revestimiento de madera ligero
73 Revestimiento de madera pesado	Yes	Revestimiento de madera pesado
80 Wood Grid, 90mm x 15mm, on 40cm of Air, Generic	Yes	Wooden grid 90/15mm on 40cm air on 1 Octave Data ...
80+ Wood Grid, 90mm x 15mm, on 40cm of Air, Generic + scatt	Yes	Wooden grid 90/15mm on 40cm air on 1 Octave Data ...
90 Plataforma de madera	Yes	Plataforma de madera con cámara de aire

Figura 11. Listado de materiales acústicos del modelo geométrico del Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial

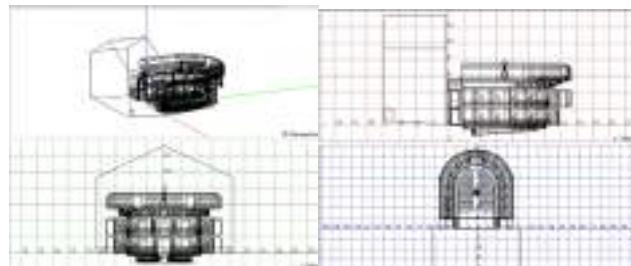


Figura 12. Modelo geométrico del Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial

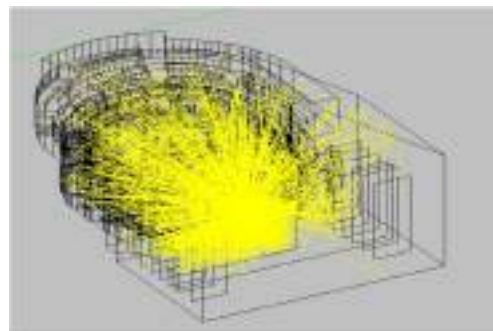


Figura 13. Comprobación mediante *Ray Tracing* del modelo geométrico del Real Teatro Carlos III de Aranjuez

Wall Material	Used	Description
120 barandilla escapota 1	Yes	Barandilla escapota Toppun board, 12.5mm thick mounted over 3cm of airspace Octav...
70 Revestimiento de madera 2	Yes	Revestimiento de madera 2Muy baja absorción
200 Door: Hollow Core, Wood, Generic	Yes	Door: Hollow Core, Wood Octave Data: 125Hz-4kHz Data Unattributed
31= Batuta tapizada terciopelo 1 = scatt	Yes	Batuta tapizada terciopelo 1: ceiling batuta in occup
01 a = 10%	Yes	10% Sound Absorbing
120+2 barandilla escapota 1 + scatt 2	Yes	barandilla escapota Toppun board, 12.5mm thick mounted over 3cm of airspace Octav...
STEEL	Yes	STEEL PANEL ON WALL OR SURFACE
60= Wood Grid: 50mm x 15mm, on 40cm of Air, Generic + scatt	Yes	Wooden grid 50/15mm on 40cm air only Octave Data: 125Hz-4kHz Data Unattributed.
50 Plataforma de madera	Yes	Plataforma de madera con cámara de aire
75 Contrachapado de madera	Yes	Contrachapado de madera 25mm
53 Tapfo de terciopelo ISO	Yes	Tapfo de terciopelo ISO
71 Revestimiento de madera 2	Yes	Revestimiento de madera 2Baja absorción
125+2 barandilla metálica + scatt 2	Yes	barandilla metálica: ceiling strips 0.2m
55 Entesa Terciopelo Meda	Yes	Medusa Weight Drapes, 14 oz per sq yd, draped to half area (ie 2 ft of drapes per 1 ft of w...
125+1 barandilla metálica + scatt 1	Yes	barandilla metálica: ceiling strips 0.2m
36 Silla semitapizada	Yes	Silla semitapizada
22 Revestimiento de madera ligero	Yes	Revestimiento de madera ligero
CARPET COMM	Yes	COMMERCIAL GRADE CARPET
PARTI CON	Yes	WOOD PARQUET IN ASPHALT ON CONCRETE
PLAST.FTHR	Yes	ROUGH FINISH ON LATH
120+1MODIF	Yes	Totally SoundAbsorbing
20=uraMOD	Yes	Totally SoundAbsorbing
NUEV=Ostentamento3MOD	Yes	Totally SoundAbsorbing
modPLAST.LTHS	Yes	Totally SoundAbsorbing

Figura 14. Listado de materiales acústicos del modelo geométrico del Real Teatro Carlos III de Aranjuez

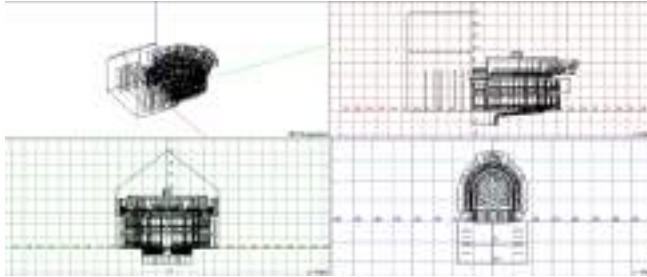


Figura 15. Modelo geométrico del Real Teatro Carlos III de Aranjuez

6. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS GEOMÉTRICOS

Debemos comentar que todo lo que se va explicar a continuación corresponde a la comparación de los valores promedio medidos in situ y los valores promedio simulados de los diferentes parámetros acústicos. Por tanto, esta primera validación la denominaremos validación de valores promedio.

En primer lugar, debemos de comprobar que el tiempo de reverberación calculado mediante acústica estadística por el programa de simulación acústica EASE se asemeja al obtenido in situ. Actuaremos de la misma forma con la acústica geométrica, el primer paso consiste en validar los valores obtenidos para el tiempo de reverberación. Esto se va a realizar con la herramienta *Aura Mapping*. Una vez que los tiempos de reverberación nos parecen estar dentro de valores adecuados de JND, comenzaremos a hacer la comprobación con los parámetros energéticos C50, C80 y con los parámetros de inteligibilidad STI, Alcons. Primero con acústica estadística mediante la herramienta *Standard Mapping* y posteriormente con *AURA Mapping*.

Una vez que hemos realizado todos los pasos anteriores, vamos a representar el parecido entre los valores promedio de los parámetros medidos in situ y los valores promedio, vamos a calcular la distancia entre ellos mediante una métrica en distancia JND (definida mediante escalones JND) y la vamos a representar en forma de matriz JND, mediante la asignación de un código de colores. Asimismo, vamos a calcular el porcentaje de celdas de la matriz que están en cada escalón de JND y el acumulado entre 1-3 JND.

Tabla 2. Validación en métrica JND del modelo geométrico del Teatro Real Coliseo Carlos III de El Escorial

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número	89	77	57	14	2	0	0	0	0	0
% sobre Total	37%	32%	24%	6%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
% acumulado	37%	69%	93%	99%	100%					

	1	2	3
Número	89	77	57
% sobre Total	37%	32%	24%
% acumulado	37%	69%	93%

Tabla 3. Validación en métrica JND del modelo geométrico del Real Teatro Carlos III de Aranjuez

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número	90	88	39	10	2	0	2	0	0	0
% sobre Total	38%	37%	16%	4%	4%	0,4%	0%	1%	0%	0%
% acumulado	38%	74%	91%	95%	99%	99%	99%	100%		

	1	2	3
Número	90	88	39
% sobre Total	38%	37%	16%
% acumulado	38%	74%	91%

A la vista de los resultados de las tablas 2 y 3, podemos ver que el acumulado 1-2 JND es del 69% en El Escorial y del 74% en Aranjuez. El acumulado 1-3 JND es del 95% en el Escorial y del 91% en Aranjuez en un análisis en bandas de 1/3 de octava.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El procedimiento desarrollado para la validación del modelo geométrico intenta valorar el comportamiento del modelo con respecto de una cantidad elevada de parámetros medidos en las salas. Entendemos que en ambos casos el resultado se puede considerado como satisfactorio.

Las futuras líneas de trabajo consisten en realzar un estudio de las simulaciones de los dos teatros considerando solamente la sala (sin caja escénica), tratando de encontrar la similitud original entre ambos teatros.

8. REFERENCIAS

- [1] Aranda Huete A., et all, "III Centenario del nacimiento de Carlos III," *Biblioteca de Estudios Madrileños*, CSIC, 2017.
- [2] AENOR, «Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos. UNE- EN ISO 3382-1:2009», 2010.
- [3] Alonso García M, "Diseño y Validación de un modelo geométrico del Real Coliseo Carlos III de El Escorial", UPM, 2021.
- [4] Sánchez Gass I., "Diseño y Validación de un modelo geométrico del Real Teatro Carlos III de Aranjuez", UPM, 2021.



MODELO ACÚSTICO DE LA BASÍLICA DEL REAL MONASTERIO DE SAN LORENZO DEL ESCORIAL

María Larrosa Navarro^{1*}
Antonio Pedrero González¹
Daniel de la Prida Caballero²

¹Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040, Madrid, España

²Department of Signal Theory and Communications, Universidad Carlos III de Madrid, Avd. de la Universidad 30, 28911, Leganés, España

RESUMEN

El Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial es un lugar de suma importancia en la historia musical española. El recinto más relevante de este complejo arquitectónico es la basílica, donde los monjes jerónimos pasaban un mínimo de ocho horas diarias llevando a cabo el oficio de las horas y donde se celebraban las grandes festividades religiosas. En todas estas actividades la música, y en especial la música vocal, tenía un papel fundamental, aunque también se realizaban interpretaciones instrumentales (órgano) y teatrales (villancicos, autos sacramentales, etc.).

Esta comunicación describe el trabajo realizado para la creación y calibración del modelo virtual de la basílica. La planimetría del espacio se obtuvo mediante mediciones con escáner láser y, a partir de las nubes de puntos medidas, se levantó el modelo tridimensional utilizando el software SketchUp. Posteriormente, éste fue calibrado mediante el programa de simulación acústica *Odeon*®. Para comprobar la veracidad acústica del modelo se realizaron mediciones *in-situ* que fueron utilizadas para comprobar que los resultados de la simulación se corresponden con las mediciones. La basílica se conserva hoy en día en un estado prácticamente idéntico al original, por lo que el modelo creado representa fielmente el estado del recinto en siglos anteriores.

ABSTRACT

The Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial is a place of great importance in Spanish musical history. The most relevant enclosure of this architectural complex is the basilica, where the Hieronymite monks spent a minimum of eight hours a day while celebrating the liturgy of the hours and where major religious festivities were held. In all these

activities, music, and especially vocal music, played a fundamental role, although instrumental (organ) and theatrical (*villancicos*, auto sacramentals, etc.) interpretations were also performed.

This communication describes the work carried out for the creation and calibration of the virtual model of the basilica. The planimetry of the space was obtained by laser scanner measurements and, from the measured point clouds, the three-dimensional model was built using the software SketchUp. Subsequently, the model was calibrated using the acoustic simulation software *Odeon*®. To check the acoustic veracity of the model, *in-situ* measurements were taken. These measurements were used to verify that the simulation results correspond to the measurements. The basilica has been preserved in a state practically identical to the original, which means that the model created faithfully represents the state of the room in previous centuries.

Palabras Clave— reconstrucción virtual, modelo geométrico, caracterización acústica, acústica de templos

1. INTRODUCCIÓN

Los recintos históricos han sido foco de estudio de disciplinas como la arquitectura y la historia del arte desde hace décadas, pero sólo en los últimos treinta años esta investigación se ha transmitido también al mundo de la acústica [1–5]. Este interés ha surgido debido a la estrecha relación que existe entre las actividades sociales y artísticas que se llevaban a cabo en estos espacios y la acústica del recinto. Esta acústica se trata de una cualidad intangible y dependiente del espacio arquitectónico. El deterioro de estos espacios y, en muchos casos, la renovación de sus interiores para adaptarlos a los usos actuales, han producido la pérdida de un entorno

* **Autor de contacto:** m.larrosa@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

acústico de incalculable valor. La caracterización acústica y las herramientas de simulación permiten la conservación de estos entornos e, incluso, la posibilidad de estudiar las características acústicas de estados anteriores.

El Monasterio de San Lorenzo del Escorial se trata de un entorno arquitectónico de gran relevancia en España debido a su historia, su arquitectura y al arte desarrollado por sus moradores. Desde su fundación hasta el siglo XIX estuvo habitado por una comunidad de 150 monjes jerónimos. La Orden Jerónima se trata de una orden exclusivamente española que daba una especial importancia al rezo de los oficios divinos [6]. Durante siglos, la música ha tenido un papel principal en la realización de la liturgia de las horas y la misa [7]. Este arte fue potenciado por Felipe II y sus sucesores, lo cual convirtió al Escorial uno de los focos más importantes para el desarrollo de la música religiosa en España [7]. El enclave esencial para este desarrollo artístico ha sido la basílica del monasterio, cuya acústica fue participe en la actividad musical durante casi 300 años.

La presente comunicación se centra en la creación y calibración del modelo geométrico de esta basílica. El modelo arquitectónico fue creado a partir de un conjunto de nubes de puntos medidas con un escáner láser 3D. Este modelo fue posteriormente trasladado al programa de simulación acústica *Odeon*® y se calibró mediante la utilización de respuestas al impulso. Estas respuestas fueron obtenidas previamente en una campaña de mediciones que se realizó en la basílica y otros entornos del monasterio [8]. La reconstrucción virtual del espacio sonoro de esta basílica permitirá recrear las interpretaciones musicales que se llevaron a cabo en su interior, al igual que estudiar la relación que esta música tiene con sus características acústicas.

Esta comunicación se ha dividido en cuatro apartados principales. En primer lugar, se hará una breve explicación de la historia de este monumento y de sus características arquitectónicas. Después, se explicará la metodología seguida en las mediciones *in-situ* y se presentarán los resultados obtenidos para los parámetros acústicos T_{20} y C_{80} . Posteriormente se explicará la realización de su modelo arquitectónico y, por último, se expondrán los pasos seguidos para la validación del modelo acústico.

2. DESCRIPCIÓN DE LA BASÍLICA

El Monasterio de San Lorenzo del Escorial fue una empresa arquitectónica emprendida por el rey Felipe II. Su intención era construir un espacio que fuera a la vez monasterio en alabanza a dios, palacio donde él y sus sucesores pudieran residir, y centro de educación en filosofía y teología. Dentro de los cuatro muros que limitan el monasterio estos tres mundos tienen espacios bien diferenciados. La basílica es el lugar que, simultáneamente, los divide y los une, encontrándose en el centro de la construcción.



Figura 1. Interior de la basílica del Monasterio de San Lorenzo del Escorial.

La primera piedra de este templo fue asentada el 20 de agosto de 1563 y se dio por finalizada el 10 de agosto de 1586. La planta original del templo fue diseñada por el arquitecto italiano Pachote y la construcción fue dirigida por los arquitectos Juan Bautista de Toledo y Juan de Herrera [9].

El interior de la nave de la basílica corresponde con una cruz griega de 50 metros de lado que se extiende al este por el altar y al oeste por el coro. Estas extensiones crean la impresión de una planta de cruz latina. El interior de la basílica está dividido en tres naves: la principal, que presenta una altura de 30 metros, y las dos naves laterales, de 19 metros. En el cruce de la nave principal y el transepto se levanta una cúpula de 17 metros de diámetro, cuyo punto más alto se encuentra a 60 metros del pavimento. Alrededor de la basílica, exceptuando el lado este, se abren nueve capillas laterales. El coro, lugar donde la comunidad realizaba el oficio de las horas, está ubicado en el lado oeste de la nave. Se encuentra situado a una altura de 8 metros y presenta unas dimensiones de 26 x 15,5 metros. Debajo del coro, se sitúa el conocido como sotocoro, espacio separado de la basílica por un enrejado y desde donde la población podía asistir a las celebraciones que se realizaban en la basílica. El coro, la nave principal y el transepto se encuentran cerrados por un techo en forma de bóveda de cañón. El resto de la nave, las capillas laterales y el sotocoro presentan un techo abovedado.

La mayor parte del templo se encuentra construido en piedra berroqueña, que fue obtenida de una cantera cercana de la Sierra de Guadarrama [9]. Este material fue utilizado en las paredes de toda la basílica, en sus cuatro pilares centrales y en los arcos que dividen los espacios. El suelo del recinto está construido en mármol y las bóvedas del techo se terminaron en yeso, que durante el siglo XVII fue decorado con las pinturas que se conservan hoy en día. El altar y el retablo están principalmente construidos en mármol, aunque se pueden encontrar decoraciones y estatuas en jade y bronce.

Tabla 1. Valores promedio del T_{20} (s) medidos *in situ*.

Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Fuente y micrófono en nave	9,38	9,69	9,23	8,26	6,22	4,09	2,20
Fuente en nave y micrófono en coro	9,41	9,70	9,44	8,59	6,71	4,50	2,74
Fuente en coro y micrófono en nave	9,43	9,68	9,55	8,71	6,82	4,37	2,77
Fuente y micrófono en coro	8,33	8,62	8,32	7,44	5,59	3,16	1,76
Valor promedio de la sala	9,07	9,38	9,04	8,20	6,16	3,90	2,20

3. MEDICIONES *IN-SITU*

Se llevó a cabo una campaña de mediciones acústicas que permitió obtener los valores de los parámetros objetivos que posteriormente serían utilizados para la calibración del modelo virtual. Estos parámetros se obtuvieron a partir de la medición de la respuesta al impulso, que se realizó siguiendo la norma ISO 3382-1 [10] y las recomendaciones propuestas en [2,11].

Las mediciones se llevaron a cabo a lo largo de cinco lunes (único día que el monasterio no está abierto a visitas) de los meses de junio y julio de 2021. Se realizaron en horario de mañana y el tiempo total que se necesitó para terminarlas fue de 30 horas. Estas medidas fueron realizadas por los tres autores de esta comunicación.

El equipamiento utilizado estaba formado por una fuente dodecaédrica B&K 4292-L, un amplificador de potencia B&K 2716C, una tarjeta de sonido RME Fireface UFX y un micrófono DPA 4006A. Adicionalmente se utilizó un sonómetro B&K 2270 para medir el ruido de fondo y una estación meteorológica para registrar las condiciones ambientales en las que se desarrollaron las mediciones.

Las posiciones seleccionadas para fuentes y receptores se determinaron tras la revisión bibliográfica de los textos escritos por los cronistas del monasterio [9,12]. Se eligieron todas aquellas posiciones que han sido descritas en los testimonios y, además, se añadieron un conjunto de posiciones adicionales en la nave de la basílica para facilitar la calibración. Se utilizaron 18 posiciones de fuente y 27 de receptor, que se combinaron para obtener un total de 198 respuestas al impulso.

La basílica fue dividida en dos espacios para facilitar la realización de las mediciones: la nave y el coro. Se realizaron cuatro grupos de mediciones en función del espacio en el que se encontraban la fuente y el receptor.

El programa utilizado para la generación de la señal de emisión y para procesar la señal captada por el micrófono fue el software Dirac. La señal de emisión utilizada fue un barrido sinusoidal (20 – 20k Hz) de 21,8 s de duración. El

resultado final de cada posición se obtuvo mediante el promediado de tres barridos.

Los valores promedio obtenidos de los parámetros T_{20} y C_{80} para cada grupo de mediciones se presentan en las Tablas 1 y 2, así como el valor promedio de la sala.

4. MODELO ARQUITECTÓNICO

Las mediciones de las dimensiones del recinto se realizaron el último día de mediciones acústicas mediante la utilización de un escáner láser 3D. Se tomaron medidas en siete puntos de la basílica: uno en el altar, cuatro en la nave y dos en el coro. Las medidas del sotocoro fueron tomadas utilizando un medidor láser de mano.

Las nubes de puntos fueron utilizadas para obtener las dimensiones del recinto. A partir de ellas y de las medidas tomadas manualmente se realizó un modelo simplificado de la basílica. Este modelo fue realizado en el software de diseño SketchUp e imágenes de él pueden verse en la Figura 2.

En la creación del modelo fue necesario realizar dos simplificaciones. La primera de ellas fue la aproximación de las bóvedas, arcos y cúpula de la basílica a superficies planas, debido a la incapacidad de los programas de diseño de trabajar con superficies curvas. En segundo lugar, se simplificó la geometría del retablo de la basílica, de la sillería del coro y de los órganos. Estos objetos se encuentran altamente decorados y su recreación en detalle implicaría la creación de un gran número de caras que ralentizarían futuros procesos de cálculo. La solución optada ha sido reducir estos objetos a planos de mayor tamaño a los que luego se les adjudicará un coeficiente de *scattering* elevado para compensar la simplificación.

La creación del modelo 3D se realizó mediante el uso de capas, una para cada material de la basílica. La creación de estas capas diferenciadas facilitaría posteriormente la asignación de materiales en el modelo acústico.

Una vez finalizado el modelo geométrico simplificado de la basílica se posicionaron los puntos de

Tabla 2. Valores promedio del C_{80} (dB) medidos *in situ*.

Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Fuente y micrófono en nave	-5,8	-5,7	-5,5	-5,4	-4,2	-2,2	0,8
Fuente en nave y micrófono en coro	-15,5	-15,5	-15,5	-14,1	-12,6	-10,4	-4,8
Fuente en coro y micrófono en nave	-15,9	-14,0	-17,2	-15,7	-14,4	-11,3	-8,3
Fuente y micrófono en coro	-1,3	-1,8	-1,7	-1,3	-1,4	0,6	3,4
Valor promedio de la sala	-4,9	-5,2	-5,1	-4,8	-4,3	-2,3	0,7



Figura 2. Modelo arquitectónico de la basílica (izq.: vista exterior; centro: altar; dcha.: coro).

fuente y de receptor utilizados en las mediciones a partir de una extensión de *Odeon*® disponible para SketchUp. Una vez terminado, se exportaron el modelo en formato .Par y las posiciones de fuente y micrófono en formato .SouRecScript.

5. MODELO GEOMÉTRICO Y CALIBRACIÓN

Los dos ficheros exportados de SketchUp fueron cargados en el software de simulación acústica *Odeon*® y, en primer lugar, se comprobó que el modelo estuviera correctamente cerrado y que no hubieran superficies solapadas.

Gracias a las visitas realizadas a la basílica y a las descripciones disponibles en numerosos libros [9,12] es fácil conocer los materiales que la constituyen. El material más común es la piedra berroqueña, seguida por el yeso y el mármol. En menor cantidad, existen otros materiales como cristal, bronce y madera. Los primeros coeficientes de absorción adjudicados a estos materiales fueron obtenidos de bases de datos y de otros trabajos de recreación de recintos históricos [13,14]. Tras la adjudicación de los materiales se especificó en el *set up* de simulación las condiciones ambientales que había durante las mediciones, que se corresponden con una temperatura de 12,6 °C y un 25% de humedad relativa.

La calibración del modelo se realizó utilizando como guía las respuestas al impulso medidas en la basílica. No se utilizaron todas las respuestas medidas debido a que algunas de las combinaciones fuente y micrófono utilizadas hacen referencia a situaciones históricas muy concretas y no representan adecuadamente la transmisión del sonido en todo el espacio.

El proceso de calibración se realizó de forma escalonada. En primer lugar, se utilizaron las posiciones de fuentes y receptor situadas en la nave para calibrar este espacio, que es el que más volumen ocupa. Seguidamente, se verificó la similitud de los resultados obtenidos en la simulación con los de las respuestas al impulso medidas en el altar. Por último, se calibró el coro, que debido a su posición y decoración actúa como una “sala dentro de una sala”.

Los resultados de las simulaciones se compararon con los parámetros objetivos obtenidos de las mediciones acústicas. Se intentó en todo momento que la diferencia entre el valor simulado y el medido fuera inferior a 1 JND. El primer parámetro que se calibra es el T_{20} y, una vez ajustado,

se comprueba la adecuación del EDT, T_s y C_{80} . En cada iteración de la calibración, los coeficientes de absorción y *scattering* de los materiales se modifican para ajustar los resultados de la simulación a las mediciones.

El primer intento de ajuste de la basílica no se consideró adecuado debido a los grandes cambios que fue necesario realizar en los materiales para conseguir valores de T_{20} semejantes a los medidos en la sala. La basílica, como se ha podido ver en los resultados de las mediciones, se trata de un recinto altamente reverberante. El principal problema de esta primera simulación acústica es que la sala era mucho menos reverberante a causa de la elevada absorción del aire. Para poder ajustar los valores del T_{20} fue necesario reducir considerablemente los coeficientes de absorción de materiales como la piedra, el yeso o el mármol. Con estas modificaciones fue posible ajustar el margen de bajas y medias frecuencias, pero independientemente de los intentos realizados, fue imposible ajustar las bandas de 2, 4 y 8 kHz. Una modificación tan elevada de los materiales no contentó a los autores de esta comunicación debido a que los coeficientes de absorción iniciales de estos materiales fueron utilizados con éxito en las simulaciones de otros recintos del Monasterio de San Lorenzo.

La mayor fuente de absorción en este primer modelo acústico es el aire. Los programas de simulación acústica consideran que la temperatura y la humedad relativa en todo el recinto son homogéneas, lo cual no se cumple en volúmenes tan grandes como el de la basílica. En estos espacios, la temperatura y la humedad varían en función de la zona, la altura e, incluso, existen corrientes de aire que afectan a la propagación del sonido. Se considera que esta simplificación ha tenido un gran efecto sobre los resultados de las simulaciones. Además, tras buscar bibliografía referente al efecto que los cambios de humedad relativa y temperatura tienen sobre la absorción del aire, se ha podido comprobar que para la combinación de condiciones ambientales en las que se realizaron las mediciones, las bandas de 2, 4 y 8 kHz se encuentran muy cerca de un máximo de absorción [15].

Para solucionar el problema de la absorción del aire se decidieron modificar las condiciones ambientales de la simulación. Tras la realización de varias pruebas se decidió fijar la temperatura de la simulación en 16,5 °C y la humedad relativa en un 40%. Con estas nuevas condiciones, se volvió

Tabla 3. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en el modelo acústico según la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente absorción								Scattering
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Alfombra	0,060	0,060	0,120	0,200	0,280	0,390	0,530	0,530	0,020
Bronce, jade y metales	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,050
Cristal	0,140	0,100	0,040	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020
Madera	0,210	0,210	0,220	0,200	0,170	0,110	0,100	0,100	0,050
Madera sillería	0,210	0,112	0,084	0,084	0,084	0,046	0,030	0,030	0,400
Mármol altar	0,040	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,080	0,080	0,200
Mármol suelo	0,010	0,011	0,013	0,018	0,021	0,024	0,026	0,016	0,02
Órgano	0,530	0,530	0,500	0,570	0,620	0,600	0,600	0,300	0,350
Piedra berroqueña	0,044	0,044	0,042	0,032	0,032	0,032	0,016	0,014	0,060
Pinturas	0,027	0,027	0,043	0,093	0,170	0,243	0,410	0,410	0,050
Ventana	0,140	0,100	0,040	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,050
Yeso	0,060	0,040	0,030	0,030	0,021	0,015	0,015	0,015	0,040

a realizar el mismo método de calibrado, comenzando con la nave de la basílica, comprobando después el altar, y finalizando en el coro.

Se volvió a intentar que la diferencia entre los valores medidos y los simulados fuera inferior a 1 JND, aunque esto no fue posible para todas las combinaciones fuente y micrófono, aceptándose de forma general que la diferencia entre ambos valores fuera inferior a 3 JNDs. En este caso únicamente fue necesario modificar los coeficientes de absorción del yeso que conforma los techos del recinto y la sillería del coro. Los valores de los coeficientes de los materiales ajustados para la calibración del modelo se muestran en la Tabla 3.

La comparativa de los valores medidos *in-situ* y los valores simulados para el T_{20} se muestran en las Figuras 3 y 4. Se puede observar que, tanto en las posiciones de la nave como en las del coro, las frecuencias en las que peor ajuste se ha podido realizar es en las bandas de 4 y 8 kHz. Se tratan de las dos únicas bandas donde se obtienen diferencias superiores a 3 JND. Esta diferencia se debe, una vez más, a la absorción del aire.

En ambas posiciones, las simulaciones realizadas para las bandas de 125 a 1000 Hz presentan una diferencia inferior a 1 JND con los resultados de las mediciones. Las bandas de 63 Hz y 2 kHz presentan diferencias de menos de 2 JND para el caso de la nave y de 3 JND para el caso del coro. Las diferencias para las bandas de 4 y 8 kHz para las dos situaciones son superiores en todos los casos a 6 JND.

A pesar de la falta de ajuste en estas dos bandas, no se consideró adecuado realizar mayores modificaciones de los coeficientes de absorción de los materiales o aumentar las condiciones ambientales en las que se realizaba la simulación. Por lo tanto, una vez alcanzado estos ajustes, se consideró que el T_{20} del modelo de la basílica había sido correctamente ajustado.

El ajuste de los parámetros del EDT, T_s y C_{80} también se ha considerado como válido, siendo las diferencias promedio de todas las bandas de frecuencia inferiores a 4 JND para ambas posiciones. En el caso del T_s y

del C_{80} , las mayores diferencias encontradas entre valores medidos y simulados es para las bandas de 63 y 125 Hz.

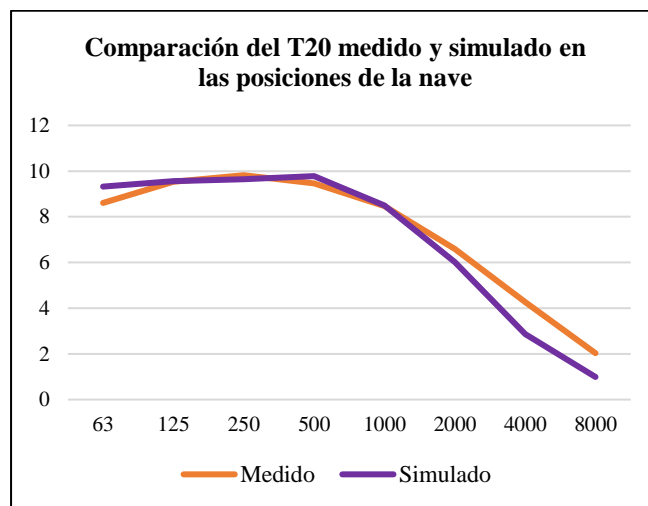


Figura 3. Comparativa medido-simulado del T_{20} en la nave.

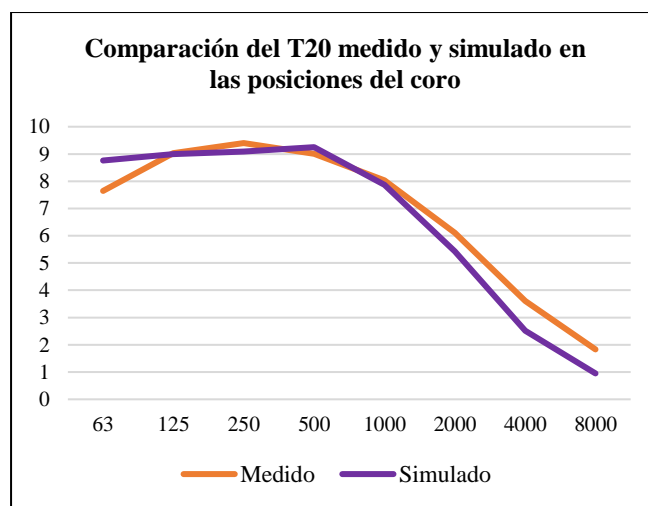


Figura 4. Comparativa medido-simulado del T_{20} en el coro.

6. CONCLUSIONES

La presente comunicación muestra el esfuerzo realizado para crear un modelo acústico representativo del campo sonoro existente en la basílica del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial. El modelo fue validado por zonas y se utilizaron como referencia respuestas al impulso medidas *in-situ*.

El principal problema afrontado durante la calibración fue la absorción del aire. Debido al gran volumen de la basílica esta absorción era muy elevada, especialmente para el margen de frecuencias de 2 a 8 kHz. Para poder ajustar el modelo fue necesario aumentar levemente tanto la temperatura como la humedad relativa. Tras este cambio fue posible ajustar el modelo con sólo la modificación de las características de absorción de dos materiales: el yeso del techo y la madera de la sillería del coro. Se consiguieron diferencias inferiores a 2 JND para las posiciones de la nave e inferiores a 3 JND para las posiciones del coro en las bandas de 63 a 2k Hz. La absorción del aire no permitió ajustar los resultados de las simulaciones para 4 y 8 kHz.

Este modelo será utilizado en futuras investigaciones para la auralización de interpretaciones musicales que tuvieron lugar en la basílica y para estudiar la realización existente entre sus parámetros acústicos y las características musicales de las piezas que fueron compuestas para este entorno.

7. AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer un especial agradecimiento a Patrimonio Nacional y a la Comunidad Agustina de San Lorenzo por permitirnos acceder a la basílica y por la atención y facilidades que se nos han prestado.

8. REFERENCIAS

- [1] Almagro-Pastor JA, García-Quesada R, Vida-Manzano J, Martínez-Irureta FJ, Ramos-Ridao ÁF. The Acoustics of the Palace of Charles V as a Cultural Heritage Concert Hall. *Acoustics*, vol. 4, Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2022, p. 800–21.
- [2] Álvarez-Morales L, Zamarreño T, Girón S, Galindo M. A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Build Environ* 2014;72:102–15.
- [3] Delgado García EM, Delgado García A, Pedrero González A, Díaz Sanchidrián C. Estudio acústico de la cripta del Hospital de San Juan Bautista de Toledo 2017.
- [4] Álvarez-Morales L, Lopez M, Álvarez-Corbacho Á. Cathedral Acoustics: Bristol Cathedral as a Case Study. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, vol. 259, Institute of Noise Control Engineering; 2019, p. 6457–68.
- [5] Gómez Alfageme JJ, Nogueira López P, Martellotta F, Blanco Martín E, Ciani F, Gonzalo Galán J, et al. Acoustic characterization of Cathedral of Santiago de Compostela. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, vol. 259, Institute of Noise Control Engineering; 2019, p. 7925–36.
- [6] Sierra Pérez J. La realeza en la liturgia: Monasterio del Escorial (Siglo XVI, Felipe II). In: Prensa L, Calahorra P, editors. *XIII y XIV Jornadas de Canto Gregoriano. XIII Música en la hispania Romana, Visigoda y Medieval. XIV Los monasterios, senderos de vida*, Zaragoza: Institución Fernando el Católico; 2010, p. 125–55.
- [7] Hernández González L. Música y culto divino en el Real Monasterio de El Escorial (1563-1837). *San Lorenzo de El Escorial: Ediciones Escorialenses*; 1993.
- [8] Larrosa Navarro M, Pedrero González A, De la Prida Caballero D. Caracterización acústica de los espacios sonoros del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial. *Tecniacústica*, Elche: 2022.
- [9] Fray José de Sigüenza. *La fundación del Monasterio de El Escorial*. Madrid: Turner Libros, S.A.; 1988.
- [10] International Organization for Standardization. *Acoustics — Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters (ISO 3382:1997)*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 1997.
- [11] Martellotta F, Cirillo E, Carbonari A, Ricciardi P. Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics* 2009;70:378–88.
- [12] Quevedo J. *Historia del Real Monasterio de San Lorenzo, llamado comunmente del Escorial, desde su origen y fundación hasta fin del año 1848 y descripción de las bellezas artísticas y literarias que contiene*. Madrid: Establecimiento tipográfico de Mellado; 1849.
- [13] Pedrero González A. *Restauración virtual del patrimonio sonoro. Aplicación al antiguo rito hispánico*. Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [14] Martellotta F, Castiglione ML. On the use of paintings and tapestries as sound absorbing materials. *Forum Acusticum* 2011, 2011.
- [15] Harris CM. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *J Acoust Soc Am* 1966;40:148–59.



RECUPERACIÓN ACÚSTICA DEL TEATRO DEL SEMINARIO DEL MONASTERIO DE SAN LORENZO DEL ESCORIAL

María Larrosa Navarro^{1*}
Antonio Pedrero González¹
Daniel de la Prida Caballero²

¹Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040, Madrid, España

²Department of Signal Theory and Communications, Universidad Carlos III de Madrid, Avd. de la Universidad 30, 28911, Leganés, España

RESUMEN

Desde la finalización de su construcción en 1584, el Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial apenas ha sufrido modificaciones. El cambio de mayor impacto para su conservación histórica ha sido el llevado a cabo en la conocida como Lonja del Colegio, situada en la zona del monasterio correspondiente con el Colegio y Seminario. En este espacio residían aproximadamente un centenar de estudiantes que eran formados en filosofía y teología y cuya principal actividad artística era la representación de obras teatrales, tanto de carácter religioso (autos sacramentales), como de carácter profano (comedias, loas, etc.). Estas representaciones, siguiendo la tradición comenzada en el siglo XVI, eran siempre acompañadas de interpretaciones musicales.

El espacio donde se interpretaban estas obras está actualmente ocupado por el Salón de Actos del Colegio Alfonso XII. La presente comunicación muestra el esfuerzo llevado a cabo para reconstruir virtualmente el estado original del entorno. El modelo arquitectónico ha podido crearse gracias a que el estado actual del recinto permite entrever su estructura original. Aunque no se ha podido llevar a cabo una calibración del modelo acústico mediante la realización de mediciones *in-situ*, los materiales utilizados para la simulación sí que han sido calibrados en otros entornos del monasterio.

ABSTRACT

Since the completion of its construction in 1584, the Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial has hardly been modified. The change with the greatest impact on its historical preservation has been the one carried out in the area

known as the Lonja del Colegio, located in the zone of the monastery corresponding to the Seminar and School. Approximately one hundred students who were trained in philosophy and theology resided in this space. Their main artistic activity was the representation of theatrical plays, both of a religious nature (auto sacramental) and of a profane nature (comedies, loas, etc.). These interpretations, following the tradition begun in the 16th century, were always accompanied by music.

The space where these works were performed is currently occupied by the Assembly Hall of the Colegio Alfonso XII. The present communication shows the effort carried out to virtually reconstruct the original state of the environment. It has been possible to create a faithful architectural model since the current state of the site allows a glimpse of its original structure. Although it has not been possible to carry out a calibration of the acoustic model by performing *in-situ* measurements, the materials used for the simulation have been calibrated in other rooms of the monastery.

Palabras Clave— reconstrucción de patrimonio, modelo geométrico, simulación virtual

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías de realidad acústica virtual ha abierto un gran abanico de nuevos campos de investigación. En el caso de la acústica arquitectónica, una de estas ramas es la investigación de las características acústicas de recintos que ya no existen o que han sido muy modificados [1–5]. Los softwares de simulación acústica han permitido obtener sus parámetros objetivos y comprender cómo el sonido se propaga en ellos, mientras que las herramientas de

* **Autor de contacto:** m.larrosa@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

auralización nos permiten escuchar cómo sonaban estos espacios.

La reconstrucción acústica de un espacio que ya no existe es una tarea de difícil ejecución. En primer lugar, esta reconstrucción implica la creación de un modelo arquitectónico del espacio. En muchas ocasiones la geometría del espacio es sencilla de conocer debido a que no ha sido ampliamente modificada o a la existencia de planos de construcción. Suele ser más complicado averiguar los materiales utilizados en la construcción y la decoración del espacio.

Con el fin de reconstruir el estado original de un recinto, muchos investigadores parten de su estado actual [2,3,5]. Estos trabajos suelen comenzar con la realización de un modelo acústico del espacio tal y como se encuentra hoy en día, utilizando para su calibración respuestas al impulso o parámetros objetivos que fueron medidos *in-situ*. Una vez el modelo está adecuadamente calibrado, se eliminan las modificaciones que se han realizado a lo largo de los años y, en algunos casos, se añaden decoraciones o elementos que fueron quitados en épocas anteriores. El modelo acústico resultante se considera como representativo del espacio original.

El objetivo de la presente comunicación es mostrar los resultados obtenidos en la reconstrucción de un espacio desaparecido del entorno del Monasterio de San Lorenzo del Escorial. Este espacio está situado en la zona del monasterio correspondiente al antiguo Colegio y Seminario y, en épocas anteriores, era conocido como la Longa del Colegio. Se trata de un lugar de gran relevancia artística ya que en él los alumnos de estas instituciones realizaban la interpretación de obras teatrales, que siempre incluían música.

El estado original de la Lonja del Colegio fue modificado a principios del siglo XVIII. Se consideró de interés la simulación de ambas situaciones. Para ello, se han creado dos modelos acústicos con el fin de evaluar el efecto que las reformas tuvieron sobre las condiciones acústicas del recinto.

Actualmente este espacio se encuentra ocupado por el salón de actos del Colegio Alfonso XII. La estructura arquitectónica original se ha conservado, pero el interior ha sido modificado con la inclusión de butacas, alfombras, paredes y un escenario. Estos añadidos han cambiado completamente la acústica del entorno, por lo que la realización de mediciones acústicas es inservible en este caso. Los coeficientes de absorción de los materiales del modelo acústico de la Lonja se han obtenido de los modelos acústicos de otros espacios del monasterio que sí que pudieron ser calibrados mediante mediciones *in-situ*. Estos modelos posibilitarán en el futuro realizar auralizaciones que nos permitan escuchar cómo estas piezas fueron experimentadas por sus moradores.

La presente comunicación está dividida en tres apartados principales. En primer lugar, se hará una pequeña explicación de la importancia que este espacio ha tenido en la



Figura 1. Lonja del Colegio antes de la construcción del salón de actos.

vida artística del monasterio y se hará una descripción de sus dos estados anteriores y su estado actual. Después, se mostrarán los pasos seguidos para obtener las dimensiones del recinto y levantar un modelo geométrico de él. Por último, se expondrán los materiales utilizados en los modelos acústicos y se presentarán los resultados obtenidos mediante simulación para los parámetros objetivos T_{20} y C_{80} .

2. DESCRIPCIÓN DEL TEATRO DE LA LONJA

La presencia de un Colegio y un Seminario en el Monasterio de San Lorenzo del Escorial fue considerada esencial desde su construcción. Una de las nuevas directrices aprobadas en el Concilio de Trento fue que todos los centros monásticos debían incluir un centro de formación religiosa [6]. Felipe II, en su intención de crear una institución modelo para los demás centros religiosos españoles, dedicó un cuarto del espacio del monasterio a este fin [7].

El Seminario estaba formado por 40 alumnos de entre 13 y 22 años que se formaban en gramática, latín y canto llano. Una vez terminada esta formación, podían pasar al Colegio, donde existían 32 plazas para el estudio de teología y filosofía [7]. La principal actividad artística de estos estudiantes era la interpretación de obras teatrales. En muchas ocasiones estas obras eran utilizadas como complemento a su formación y versaban sobre cuestiones éticas y morales, con una fuerte temática religiosa. A pesar de ello, este mundo joven también cultivó el teatro profano, al igual que ocurría en los demás centros universitarios de la época [8].

Estas obras teatrales, siguiendo la tradición comenzada en el siglo XVI, eran siempre acompañadas por música. Los autores de estas partes musicales eran los propios monjes jerónimos, que asistían habitualmente a las interpretaciones [8].

El lugar denominado como la Lonja del Colegio, también referido en algunos textos como el Teatro del Seminario, se trata de un paseo abierto y porticado situado entre dos claustros. Este espacio presenta una forma

rectangular de 26x10 m. En tres de sus cuatro lados está rodeado de arcos de 2,30 metros de anchura y 3,80 de altura que conectan con los pasillos laterales que dan a los claustros. Encima de estos arcos se corresponde un orden de ventanas situadas a 4,40 metros de altura y que actúan como balcones. En palabras de uno de los habitantes del monasterio: “Encima de los arcos responde un orden de ventanas con parapetos de hierro que corren por el entorno, y dan mucho ser a la lonja, porque parece un teatro, hecho de propósito para actos públicos y representaciones donde cabe, y goza bien lo que se hace mucha gente” [7]. El primer techo que tuvo el paseo fue un artesonado de madera, pero en la década de 1720 fue cubierto por un lienzo pintado al óleo, obra de Francisco Llamas [9].

Los pasillos laterales tienen una anchura de tres metros y conectan con los claustros a través de arcos que se corresponden con los del paseo. Estos arcos estaban originalmente abiertos, pero en 1726 Felipe V ordenó que se cerrasen todos con ventanas [10]. El techo de los pasillos de la primera planta es abovedado, mientras que en la segunda el techo está construido en vigas de madera.

Todo el espacio se encuentra construido en piedra berroqueña, la misma utilizada en el resto del monasterio. Las paredes de los pasillos correspondientes al lado norte, al igual que el techo abovedado de los pasillos de la primera planta, están contruidos en yeso. El techo de la segunda planta y el antiguo techo del paseo están hechos de madera. El suelo de la segunda planta está construido en losa cerámica.

La Figura 1 muestra una fotografía tomada a principios del siglo XX donde se puede observar el estado original de la Lonja.

A mediados del mismo siglo se construyó en el paseo el salón de actos del Colegio Alfonso XII, colegio concertado de la Comunidad Agustina que ocupa el antiguo espacio del Colegio y Seminario. Los arcos laterales del paseo fueron cerrados mediante paneles de madera y en el interior fueron cubiertos con cortinajes. Se construyó un suelo falso que presenta una leve inclinación, también en madera. Todo este suelo fue cubierto con butacas, a excepción de un pasillo central que lleva al escenario, situado en el lado sur. Las ventanas del segundo nivel también fueron cerradas con cortinajes. Una imagen del estado actual del salón de actos se presenta en la Figura 2.

3. MODELO ARQUITECTÓNICO

3.1. Creación del modelo geométrico

El Monasterio de San Lorenzo del Escorial no conserva prácticamente ningún plano de su construcción, y menos aún planos detallados de espacios concretos. Debido a esto ha sido necesaria la medición manual de las dimensiones de la Lonja del Colegio.

Aunque la situación actual del paseo diste mucho de su estado inicial, la estructura arquitectónica se conserva, lo



Figura 2. Estado actual del salón de actos del Colegio Alfonso XII.

que permite conocer su geometría. Los pasillos laterales se preservan en su estado original y los dos órdenes de arcos, el que da al paseo y el que da al claustro, son idénticos, por lo que se puede medir su tamaño utilizando los exteriores. La anchura de las columnas que dan al paseo se ha podido medir a través de la puerta de entrada al Salón de Actos. Y, desde su interior, ha sido posible delimitar el tamaño de las ventanas de la segunda planta, al igual que los arcos que hay sobre el actual escenario. Todas las cotas y dimensiones se han tomado utilizando un medidor láser de distancias manual.

Una vez disponibles todas las medidas del paseo y sus pasillos laterales, se ha levantado un modelo geométrico 3D en el software de diseño SketchUp. En la creación del modelo se utilizó una capa para cada material que constituía el recinto, con el fin de facilitar la asignación de materiales en el software de simulación acústica.

El modelo geométrico levantado es una simplificación de la estructura original. En primer lugar, fue necesario segmentar los arcos y las bóvedas del modelo en superficies planas, ya que los softwares de diseño no trabajan con superficies curvas. El techo original del paseo y el de la segunda planta, correspondientes con un artesonado y vigas de madera, fueron asimilados a una superficie plana a la que posteriormente se le dio un elevado nivel de coeficiente de difusión (*scattering*) en el modelo acústico. Por último, algunas decoraciones existentes en los arcos fueron eliminadas debido a que sus reducidas dimensiones no afectarían al comportamiento acústico del recinto.

Dado que el objetivo es simular el campo sonoro existente en la Lonja durante una representación teatral, al modelo virtual se le añadieron zonas de audiencia. Los asistentes a estas interpretaciones eran los propios alumnos del seminario (aproximadamente 100), la comunidad jerónima (que en promedio estaba formada por 150 monjes) y la corte (cuyo número variaba en función del monarca y la época del año). Por los testimonios se conoce que estos espectadores se situaban bajo los arcos que rodean el paseo y en las ventanas superiores [7]. Esta audiencia ha sido modelada mediante el posicionamiento de prismas rectangulares de 1,5 metros de altura y bases de 1,5x2 metros

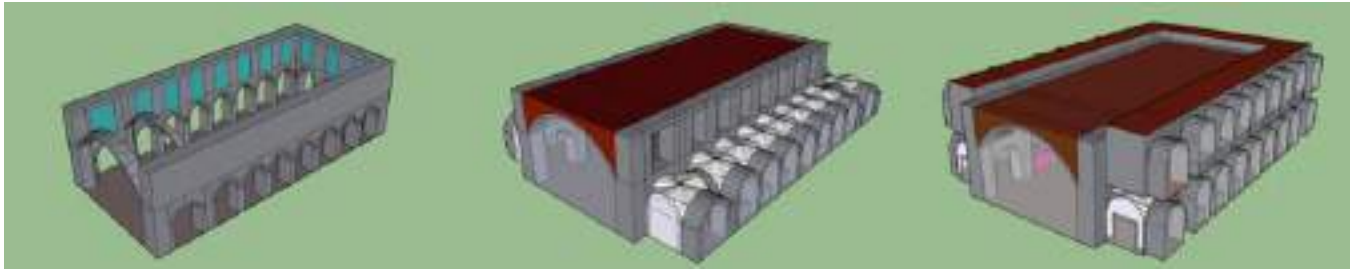


Figura 3. Proceso de modelado y versión final del modelo geométrico de la Lonja del Colegio.

en la planta baja y de 1x1 metros en la planta alta. Estos bloques equivaldrían a la presencia de 272 personas [11].

En la Figura 3 se muestran imágenes del proceso de modelado, al igual que el modelo 3D finalizado.

3.2. Renderización del modelo geométrico

Una vez finalizado el modelo geométrico simplificado, se consideró de interés la realización de su renderizado. Esta tarea se ejecutó con la intención de disponer de un modelo detallado de cómo era la Lonja del Colegio durante los siglos XVIII y XIX. Este renderizado del modelo también se llevó a cabo en SketchUp.

Para crear el modelo renderizado, fue necesario añadir los detalles previamente no considerados de los arcos, al igual que definir en detalle las vigas del techo de la segunda planta. Las caras planas de las bóvedas y arcos fueron suavizadas mediante una herramienta del programa que permite visualizarlas como curvas. Por último, se añadieron las barandillas de los balcones de la segunda planta.

Una vez detallado el modelo, a cada cara se le adjudicó una imagen que correspondía con el material del que estaba construido. Los puntos de referencia de estas imágenes fueron modificados para que se ajustasen al tamaño de las piedras de las columnas y las losas del suelo. El resultado final de la renderización se puede observar en la Figura 4.

4. MODELO ACÚSTICO

4.1. Asignación de materiales

El modelo 3D simplificado fue exportado a formato .Par para su posterior utilización en el software de simulación acústica Odeon. Una vez abierto en el programa, el primer paso fue comprobar que la geometría del recinto estuviera correctamente cerrada y que no existieran superficies solapadas que pudieran afectar a la simulación acústica.

Se decidió crear dos modelos arquitectónicos con el fin de representar los dos estados históricos de la Lonja del Colegio. El primero de ellos corresponde con los siglos XVI y XVII, en el que el que la Lonja estaba cubierta por un techo artesonado y los arcos de los pasillos laterales estaban abiertos al claustro. El segundo modelo corresponde con el estado desde comienzos del siglo XVIII hasta principios del siglo XX. En este caso el techo está cubierto por un lienzo pintado al óleo y los arcos que dan a los claustros están cerrados por ventanas.

Como se ha mencionado en la introducción, muchas investigaciones centradas en la reconstrucción del estado pasado de un recinto se basan en su estado actual. En estos casos se realizan mediciones *in-situ* con las que se calibra el modelo acústico del actual del recinto. Los materiales calibrados de ese modelo son posteriormente utilizados en el modelo del estado original del espacio.

En el caso de la Lonja del Colegio, el estado actual del recinto es completamente diferente del original, por lo que se consideró que esta metodología no sería de gran utilidad. Como la recreación de este espacio se enmarca en un proyecto de caracterización acústica y modelado de ocho recintos diferentes del Monasterio de San Lorenzo, se decidió emplear los coeficientes de absorción de materiales que habían sido utilizados en otras salas del monasterio. Estos recintos sí que se conservan en un estado prácticamente idéntico al original, por lo que los materiales pudieron ser calibrados mediante la utilización de respuestas al impulso medidas *in-situ* [12]. Los materiales utilizados en los modelos acústicos de la Lonja del Colegio se presentan en la Tabla 1.

4.2. Resultados de la simulación

El método de cálculo utilizado para la realización de la simulación se corresponde con el método de ingeniería. Las condiciones ambientales indicadas al programa son el promedio de las condiciones ambientales medidas en otros recintos del Monasterio de San Lorenzo. Una cualidad de este monasterio es que las piedras de gran tamaño que conforman su estructura actúan como aislantes, tanto al frío como al calor, por lo que la temperatura en su interior es constante a



Figura 4. Renderizado de la Lonja del Colegio.

lo largo de todo el año. La temperatura establecida es de 12,9 °C y la humedad relativa del 25%.

Las posiciones de fuente y receptor utilizadas en la simulación se eligieron siguiendo los testimonios existentes. Las posiciones de receptor se situaron bajo los arcos del paseo y en los balcones superiores, a una altura de 1,5 m, que representa a una persona de pie. Sólo se utilizó una posición de fuente y se situó en el centro del paseo, donde los testimonios indican que se ponían los actores de las representaciones.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los resultados de las simulaciones para los parámetros T_{20} y C_{80} . En cada gráfica se han representado los valores obtenidos para los dos modelos acústicos del teatro. Los valores numéricos están reflejados en la Tabla 2.

La Lonja del Colegio se trata de un espacio amplio y abierto, que conecta con pasillos laterales y otros espacios del monasterio. Estas características constructivas llevaron a la suposición de que el tiempo de reverberación existente en el recinto no sería muy alto. En los dos modelos acústicos simulados se han obtenidos valores de T_{20} muy semejantes para la banda de 1 kHz: 1,03 s para el estado de los siglos XVI/XVII y 1,17 s para los siglos XVIII/XIX.

Cabe destacar una diferencia significativa en el T_{20} entre ambos casos para las frecuencias bajas y medias. Esta diferencia es especialmente notable en las bandas de 63, 125 y 250 Hz, donde se alcanza una diferencia del T_{20} de casi 0,6 s. Esta variación se debe principalmente a que durante los siglos XVI y XVII los arcos de los pórticos que daban a los claustros se encontraban abiertos. Al cerrar estos arcos mediante ventanas, el sonido permanece en la sala, aumentando así el tiempo de reverberación del recinto.

A partir de 500 Hz, los valores obtenidos para el T_{20} comienzan a aproximarse, llegando a igualarse a partir de los 2 kHz. Este fenómeno se debe a la absorción del techo del paseo. En el siglo XVI y XVII, el techo era de madera artesonada, mientras que en el siglo XVIII fue cubierto por un lienzo. Como se puede ver en la Tabla 1, la absorción de este material comienza a aumentar a partir de los 500 Hz, lo que provoca un incremento del área de absorción del recinto.

Los valores promedio obtenidos para el parámetro C_{80} son considerablemente elevados para los dos modelos

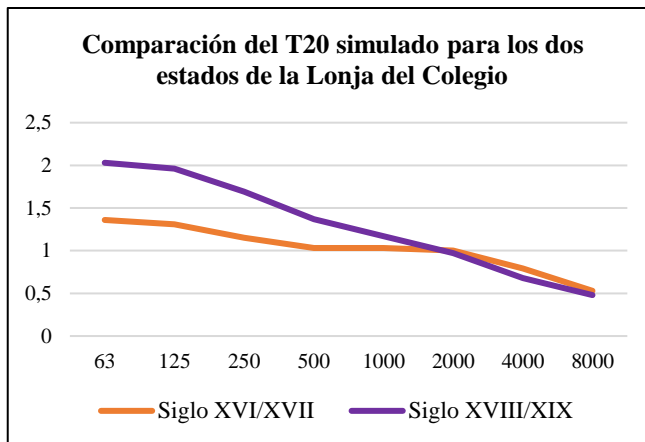


Figura 5. Comparativa de los valores del T_{20} .

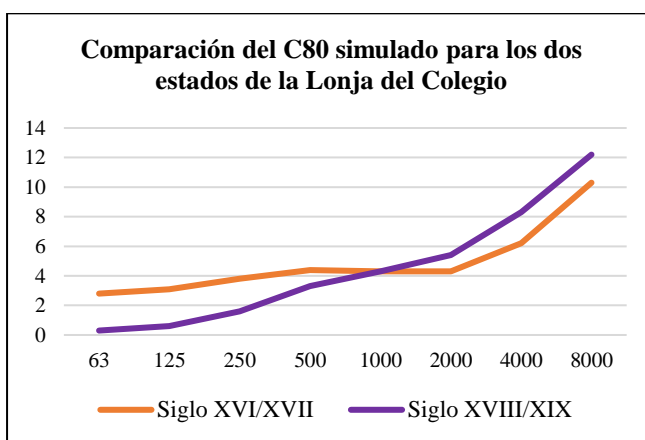


Figura 6. Comparativa de los valores del C_{80} .

acústicos. Ambas simulaciones han resultado en valores positivos para todas las bandas de frecuencia. El valor del C_{80} obtenido para 1 kHz es, en los dos modelos, de 4,3 dB.

Al comparar los valores calculados para ambos modelos, llama la atención que su relación no se corresponda con la del T_{20} . En bajas frecuencias sí se tiene un comportamiento parecido, donde existe una diferencia de casi 2 dB para las bandas de 63, 125 y 250 Hz. Esta diferencia se va haciendo menor hasta igualarse en 1 kHz. Para el T_{20} , a

Tabla 1. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados en el modelo acústico según la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Coeficiente absorción								Scattering
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Abierto	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000
Audiencia	0,200	0,260	0,460	0,870	0,990	0,990	0,990	0,990	0,650
Lienzo	0,027	0,027	0,043	0,093	0,170	0,243	0,410	0,410	0,050
Madera	0,210	0,210	0,220	0,200	0,170	0,110	0,100	0,100	0,500
Metal	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,050
Piedra	0,044	0,044	0,042	0,032	0,032	0,032	0,016	0,014	0,060
Suelo cerámico	0,010	0,012	0,013	0,016	0,021	0,024	0,024	0,024	0,060
Ventana	0,140	0,100	0,040	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,050
Yeso	0,091	0,091	0,070	0,057	0,045	0,023	0,005	0,005	0,040

Tabla 2. Valores promedio del T_{20} y C_{80} para bandas de octava obtenidos de la simulación de los modelos acústicos.

Frecuencia (Hz)		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} (s)	Siglos XVI/XVII	1,36	1,31	1,15	1,03	1,03	1,00	0,79	0,53
	Siglos XVIII/XIX	2,03	1,96	1,69	1,37	1,17	0,97	0,68	0,48
C_{80} (dB)	Siglos XVI/XVII	2,8	3,1	3,8	4,4	4,3	4,3	6,2	10,3
	Siglos XVIII/XIX	0,3	0,6	1,6	3,3	4,3	5,4	8,3	12,2

partir de esta banda de frecuencia los valores se igualan, mientras que para el C_{80} se tiene que los valores obtenidos son mayores para la simulación del estado de la Lonja de los siglos XVIII y XIX. La diferencia existente en los valores del C_{80} para el margen de 2 a 8 kHz entre los dos modelos es de casi 2 dB. Este aumento en la claridad del modelo de los siglos XVIII y XIX probablemente se deba al cambio del techo del paseo. La posición de fuente se sitúa justo en el centro del paseo, por lo que una gran cantidad de energía sonora en este margen de frecuencias es absorbida por el lienzo del techo. Este fenómeno no se produciría, en cambio, cuando el techo era de madera.

5. CONCLUSIONES

La conservación de la estructura arquitectónica de la Lonja del Colegio del Monasterio de San Lorenzo ha permitido la creación de un modelo geométrico de su estado original. A partir de este modelo y del conocimiento de las características acústicas de los materiales utilizados en el monasterio se ha podido recrear el campo sonoro del entorno en sus estados históricos.

Se han creado dos modelos acústicos: el primero, corresponde con el estado que tenía la Lonja en los siglos XVI y XVII; mientras que el segundo corresponde con los siglos XVIII y XIX. A pesar de que las variaciones arquitectónicas acontecidas no fueron muy grandes, estos cambios afectaron a la acústica del recinto. En el modelo correspondiente al siglo XVI se tiene un espacio considerablemente menos reverberante para las bajas frecuencias, donde el sonido escapa del recinto a través de los arcos abiertos. En el siglo XVIII tenemos un espacio más reverberante, pero cuyo nivel de claridad a altas frecuencias es mayor gracias a la absorción añadida por el lienzo que cubre el techo artesonado original.

La creación de estos modelos acústicos permitirá en el futuro la realización de auralizaciones con las que se pueda estudiar cómo sonaban las interpretaciones teatrales que se llevaban a cabo en su interior. Gracias a esto se podrá recuperar un patrimonio sonoro de gran relevancia para la historia de la música española.

6. AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer un especial agradecimiento al director y administrador del Colegio Alfonso II y a la Comunidad Agustina de San Lorenzo por permitirnos acceder a los claustros del antiguo Seminario y por la atención y facilidades que se nos han prestado.

7. REFERENCIAS

- [1] Sender M, Planells A, Perelló R, Segura J, Giménez A. Virtual acoustic reconstruction of a lost church: application to an Order of Saint Jerome monastery in Alzira, Spain. *J Build Perform Simul* 2018;11:369–90.
- [2] Suárez R, Alonso A, Sendra JJ. Virtual acoustic environment reconstruction of the hypostyle mosque of Cordoba. *Applied Acoustics* 2018;140:214–24.
- [3] Tronchin L, Merli F, Dolci M. Virtual acoustic reconstruction of the Miners' Theatre in Idrija (Slovenia). *Applied Acoustics* 2021;172:107595.
- [4] Postma BN, Tallon A, Katz BFG. Calibrated auralization simulation of the abbey of Saint-Germain-des-Prés for historical study. *Intl. Conf. on Auditorium Acoustics*, vol. 37, 2015, p. 190–7.
- [5] Boren B, Longair M. A method for acoustic modeling of past soundscapes. *Proceedings of the Acoustics of Ancient Theatres Conference*, Patras, Greece, 2011, p. 18–21.
- [6] Jedin H. *Historia del concilio de Trento*. Eunsa; 1981.
- [7] Fray José de Sigüenza. *La fundación del Monasterio de El Escorial*. Madrid: Turner Libros, S.A.; 1988.
- [8] Sierra Pérez J. *La música escénica de Antonio Soler en el marco del Monasterio de San Lorenzo del Escorial*. Universidad de Alcalá, 2005.
- [9] Bassegoda i Hugas B. *El Escorial como museo: la decoración pictórica mueble en el monasterio de El Escorial desde Diego Velázquez hasta Frédéric Quilliet (1809)*. vol. 2. Edicions Universitat Barcelona; 2002.
- [10] Quevedo J. *Historia del Real Monasterio de San Lorenzo, llamado comunmente del Escorial, desde su origen y fundación hasta fin del año 1848 y descripción de las bellezas artísticas y literarias que contiene*. Madrid: Establecimiento tipográfico de Mellado; 1849.
- [11] Código Técnico de la Edificación. n.d.
- [12] Larrosa Navarro M, Pedrero González A, De la Prida Caballero D. *Caracterización acústica de los espacios sonoros del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial*. Tecniacústica, Elche: 2022.

ACÚSTICA DE RECINTOS PREHISTÓRICOS: ESTUDIO ARQUEOACÚSTICO DE PALOMAS I

Lidia Álvarez-Morales^{1,2*}; Neemias Santos da Rosa^{1,2}; Daniel Benítez-Aragón¹; María Lazarich³; Margarita Díaz-Andreu^{1,2,4*}

¹ Departament de Història i Arqueologia, Universitat de Barcelona (UB), 08001 Barcelona, España

² Institut d'Arqueologia, Universitat de Barcelona (UB), 08001 Barcelona, España

³ Departamento de Historia, Geografía y Filosofía, Universidad de Cádiz (UCA), 11001 Cádiz, España

⁴ Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Barcelona, España

RESUMEN

Tradicionalmente, los yacimientos con arte rupestre se estudiaban fundamentalmente a través de la materialidad de los restos arqueológicos. Sin embargo, en los últimos años, la comunidad científica ha tomado conciencia de la importancia de sus aspectos intangibles. En este contexto, el proyecto ERC Artsoundscapes –financiado por el European Research Council (H2020 programme, Grant Number 787842)– profundiza en la percepción sonora en los yacimientos de arte rupestre, investigando la relación entre la presencia de arte rupestre y las características acústicas de los abrigos y cuevas. Este artículo presenta el estudio arqueoacústico realizado en Palomas I, una cueva situada en Cádiz (España), usando un enfoque experimental basado en el análisis de un conjunto representativo de respuestas de impulso registradas *in-situ*. Se evalúa el desempeño de la cueva como lugar de encuentro prehistórico usando una selección de descriptores acústicos, relacionando la presencia de arte rupestre y sus características acústicas. Además, se utiliza este caso de estudio para comentar tanto la aplicabilidad como las limitaciones de los procedimientos estandarizados para la acústica de salas cuando se estudian este tipo de recintos prehistóricos.

ABSTRACT

Traditionally, rock art sites were essentially studied through the materiality of the archaeological remains. Nevertheless, in the last few years, scientific community gained consciousness about the importance of their intangible aspects. In this context, the ERC Artsoundscapes project –funded by the European Research Council (H2020 programme, Grant Number 787842)– delves into the sonic perception at rock art sites, investigating the relationship

between the presence of rock art and the acoustic features of the sites where it is located. This paper presents the archaeoacoustic study conducted in Palomas I, a cave situated in Cádiz (Spain). The study employs an experimental approach built upon a representative set of room impulse responses gathered on site. A range of acoustic descriptors is employed to assess how well the cave may have functioned a meeting place in prehistory, drawing connections between the existence of rock art and its acoustic characteristics. Furthermore, this case study is used to comment on the applicability and constraints of the standardised procedures for room acoustics when dealing with this type of prehistorical sites.

Palabras Clave— Arqueoacústica, patrimonio sonoro intangible, arte rupestre.

1. INTRODUCCIÓN

En arqueología, la conservación y el estudio del arte rupestre se ha centrado tradicionalmente en los aspectos materiales de los sitios, y de las propias pinturas o grabados producidos en estos lugares [1]. Sin embargo, en las últimas décadas se ha empezado a dar cada vez más importancia a sus aspectos intangibles, evolucionando esta perspectiva tradicional hacia un enfoque multisensorial, con el objetivo de aportar una nueva dimensión a la interpretación y la conservación del arte rupestre [2]. En particular, la consideración de la componente sonora de los sitios arqueológicos ha dado lugar a la arqueoacústica [3], disciplina estrechamente ligada a los métodos científicos del campo de la ingeniería acústica.

La metodología de investigación empleada en el estudio arqueoacústico de sitios de arte rupestre ha evolucionado considerablemente desde los pioneros trabajos de Glory [4] y

* **Autores de contacto:** lidiaalvarez@ub.edu; m.diaz-andreu@ub.edu

Copyright: ©2023 Lidia Alvarez-Morales et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Reznikoff [5], que utilizaron una metodología observacional directa. En 1990, Dauvois y Boutillon introdujeron un enfoque más cuantitativo, basado en el análisis de respuestas impulsivas (RI) registradas *in situ* [6]. Desde entonces, los procedimientos experimentales utilizados tanto para registrar como para analizar las RI han ido creciendo en rigurosidad y sofisticación, hasta llegar a la incorporación de tecnología ambisonics [7-9]. En este contexto surgió el proyecto Artsoundscapes, que explora la percepción sonora y acústica en los yacimientos de arte rupestre utilizando una metodología basada en el registro de RI espaciales. Dichas RI no solo sirven como medio de recuperación y conservación del patrimonio acústico de los sitios estudiados, sino también para establecer la posible relación entre las pinturas o grabados y las características acústicas de los sitios donde se localizan.

En este trabajo se describe el estudio arqueoacústico realizado en Palomas I como parte del proyecto Artsoundscapes. Palomas I es la cueva principal del Conjunto de Cuevas de las Palomas, ubicado en la Sierra del Niño (Tarifa). La relevancia de este caso de estudio radica en que se trata de un conjunto considerado lugar de paso durante un amplio periodo de tiempo, ya que se han encontrado pinturas provenientes desde el Paleolítico Superior al Calcolítico.

2. DESCRIPCIÓN ARQUEOLÓGICA DE PALOMAS I

Palomas I (Figuras 1-3) es la cueva principal de un conjunto de arte rupestre ubicado en la Sierra del Niño, en Facinas (Tarifa, Cádiz, España). El Conjunto de Cuevas de las Palomas fue descubierto a principios del siglo XX por Werner, siendo luego visitado por Breuil y Burkitt en 1916, que lo documentan y publican en su trabajo de 1929 sobre el arte rupestre de la provincia de Cádiz [10]. El conjunto fue posteriormente estudiado por Topper y Topper [11], y también por Mas [12], pero el análisis más completo hasta el momento forma parte de la tesis doctoral de Solís (2015) [13]. Recientemente, se han descubierto pinturas paleolíticas previamente desconocidas en una de las cuevas del conjunto, concretamente en Palomas IV [14].

Se han registrado 138 representaciones en Palomas I, incluyendo restos, signos, zoomorfos, cuadrúpedos y antropomorfos. Las pinturas se ubican en tres sectores. El sector 1 (que incluye el panel con motivos post-paleolíticos, de estilo esquemático y Laguna de la Janda mostrado en la Figura 3) ocupa la pared oriental de la cavidad (131 motivos). En el muro opuesto se sitúan los sectores 2 y 3, con el sector 2 en el lado sur (2 motivos) y el sector 3 en la parte norte (5 motivos). Estos últimos incluyen las pinturas paleolíticas.

Se trata de una cavidad de 13,5 m de largo, 3,7 m de alto y 15 m de profundidad, con orientación suroeste que atraviesa por completo el macizo rocoso de la cresta arenisca de "Los Barracones", contando con dos entradas en lados opuestos, y rocas de gran tamaño en la parte central. Las paredes y el techo están visiblemente afectados por la erosión eólica.



Figura 1. Vista frontal desde la entrada sur de Palomas I. A la izquierda se sitúa el panel paleolítico, y en la parte derecha superior el panel post-paleolítico. (Fotografía de N. Santos da Rosa, 2021. ©Proyecto Artsoundscapes).

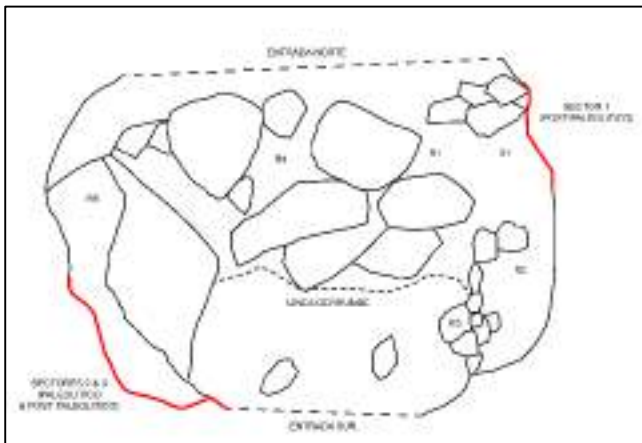


Figura 2. Croquis de Palomas I, incluyendo las posiciones aproximadas de la fuente de sonido (S) y el receptor (R) consideradas. (Autor: N. Santos da Rosa, 2021. © Proyecto Artsoundscapes).



Figura 3. Panel con motivos esquemáticos y Laguna de la Janda (Fotografía de N. Santos da Rosa, 2021. © Proyecto Artsoundscapes).

3. METODOLOGÍA

En este trabajo, la cueva de Palomas I es considerada como posible lugar de celebración o reunión, en el que podrían haberse realizado actividades de carácter ritual. Por ello, la metodología empleada para el registro y el análisis de las respuestas al impulso está basada en las recomendaciones incluidas en la ISO 3382-1 [15]. Sin embargo, al tratarse de un sitio natural y abierto, en el que no se dan condiciones de campo difuso, la aplicabilidad de dicho estándar no es directa.

En los últimos años diversos autores han reflexionado sobre las limitaciones de la ISO 3382-1 cuando se trabaja con sitios arqueológicos, atendiendo tanto a las adaptaciones necesarias del protocolo de medida para considerar las morfologías complejas e irregulares típicas de estos espacios [16], como a la cautela necesaria a la hora de interpretar los resultados de los parámetros de reverberación derivados de las curvas de caída no totalmente lineales, típicas de la distribución de absorción no uniforme inevitable en sitios abiertos [17-18]. A pesar de las mencionadas limitaciones, y ante la falta de una regulación específica, el uso de una metodología basada en la ISO3382-1 con las pertinentes adaptaciones, garantiza repetibilidad y fiabilidad a la hora de captar las respuestas impulsivas y estudiar el comportamiento acústico de los sitios de arte rupestre [19].

La sesión de medidas en Palomas I tuvo lugar el 11 de junio de 2021, mientras la cueva estaba desocupada. El plan de medición se diseñó tomando en consideración las hipótesis de uso del espacio y la morfología del sitio; es decir, las dimensiones de la cueva y la extrema irregularidad de su suelo. La fuente de sonido se posicionó frente a la zona central del panel esquemático (Figura 4). Debido a las limitaciones espaciales mencionadas, no pudo considerarse una posición de fuente adicional. Se distribuyeron un total de 5 posiciones de micrófono para cubrir el área disponible para la audiencia (Figura 2). Se eligió esta configuración espacial, al considerar el sitio como un posible lugar de reunión durante la prehistoria, en el que las prácticas de actividades sociales y rituales habrían albergado mayor número de personas y habrían sido más frecuentes que durante los rituales y ceremonias asociados a los grupos de cazadores-recolectores. Además, se trabajó con la hipótesis de orador/audiencia de pie, por lo que la altura tanto de la fuente como de los receptores se fijó en 1,4 - 1,5 m.

Las RI monoaurales se registraron sincrónicamente con la herramienta de software EASERA 1.2 [20], utilizando un micrófono omnidireccional (micW n201) como receptor, conectado con una tarjeta de sonido Zoom F4. Las RI espaciales se obtuvieron de forma asíncrona, de modo que la señal de excitación capturada por la matriz de micrófonos de 19 cápsulas Zylia ZM-1 se grabó directamente con el DAW Plogue Bidule 0.9762. Dichas grabaciones se postprocesaron en Matlab R2022a con el script SIMO [21] para obtener las RI de primer y tercer orden ambisonics. Al trabajar en un espacio abierto, se utilizaron protectores de viento con ambos

micrófonos para evitar posibles distorsiones. En ambos casos, se usó una fuente sonora dodecaédrica ultraligera IAG DD4, junto con un amplificador de potencia IAG AP4GB pre-equalizado, para emitir la señal de excitación, un barrido exponencial cubriendo un rango frecuencial de 50 Hz a 20 kHz.

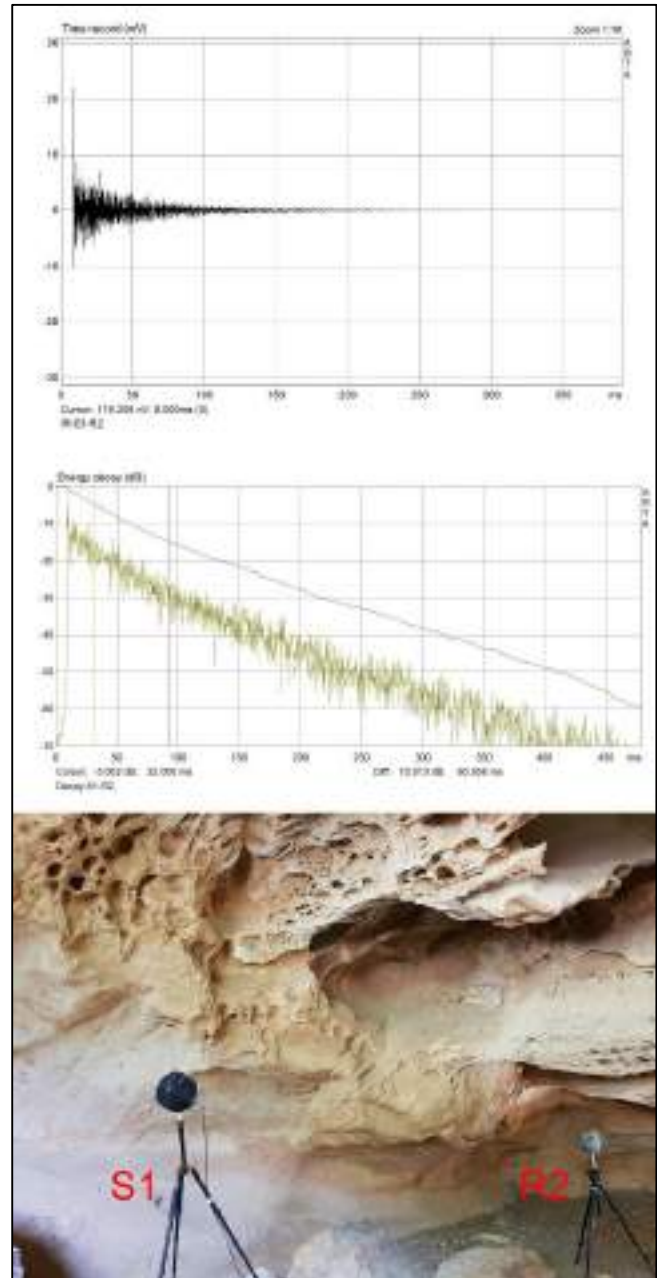


Figura 4. Respuesta al impulso (RI) y curva de caída temprana capturada en Palomas I con la fuente sonora frente al panel esquemático (S1) y receptor Zylia ZM-1 en R2. Fotografía realizada durante la sesión de medición (Fotografía de L. Alvarez-Morales, 2021. ©Proyecto Artsoundscapes).

Durante la sesión de medición se monitorizaron las condiciones ambientales en la cueva, manteniéndose una temperatura media aproximada de 25,8 °C y una velocidad del viento de 0,5 m/s, con ráfagas de hasta 1,2 m/s. El nivel de ruido ambiente se registró con el ARTA SPL meter [22], obteniendo un nivel sonoro continuo equivalente (L_{Aeq}) de 43,77 dBA, debido principalmente la interacción del viento con la vegetación fuera de la cueva y la presencia de cigarras.

Esta metodología se ha utilizado con éxito en otros sitios de arte rupestre de la zona [19,23] y la Península Ibérica [24].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las RI omnidireccionales registradas con el micW n201 y las RI binaurales (decodificadas con el complemento Binaural Decoder de IEM v. 0.6.3 [25] para Reaper. a partir de las RI de 1^{er} orden ambisonics registradas con el micrófono Zylia ZM-1) se han analizado con las herramientas software EASERA 1.2 y ARTA 1.9.4.

Todas las RI omnidireccionales muestran una estructura similar: cierta densidad de reflexiones tempranas de considerable amplitud tras la llegada del sonido directo, y escasez de reflexiones tardías que puedan causar valores elevados de reverberación o ecos. La Figura 4 muestra un ejemplo.

El tiempo de reverberación de la cueva a frecuencias medias es de unos 0,55 s (Tabla 1), lo que se encuentra dentro de los valores recomendados en acústica de salas para una correcta inteligibilidad del discurso hablado [26]. A pesar de las aperturas del espacio y la cercanía entre emisor y receptor en alguna de las zonas de audiencia, las curvas de caída temprana (EDC) derivadas de las IR cumplen los criterios de linealidad ($\zeta \leq 10\%$) establecidos en la ISO 3382-2 [27] para una correcta estimación del T_{20} , salvo en la banda de 125 Hz y algunas excepciones en la banda de 250 Hz.

Tabla 1. Resultados de los parámetros acústicos, promediados espectralmente según ISO 3382-1, obtenidos en cada pareja fuente-receptor caracterizada en Palomas I.

S-R IDs	S1-R1	S1-R2	S1-R3	S1-R4	S1-R5
S-R dist. [m]	2,56	3,45	4,87	5,27	10,6
T_{20m} [s]	0,49	0,54	0,54	0,54	0,58
ζ [%]	5,99	7,98	3,00	5,99	6,99
G_m [dB]*	19,20	17,80	15,95	17,15	13,60
C_{80m} [dB]	10,70	11,05	9,85	11,25	6,25
D_m [-]	0,82	0,83	0,76	0,83	0,64
T_{Sm} [ms]	29,34	32,42	35,56	32,25	49,01
1-IACC _{Em} [-]	0,73	0,72	0,62	0,58	0,74
1-IACC _{Lm} [-]	0,86	0,81	0,81	0,59	0,84

*Método de calibración in situ [28]

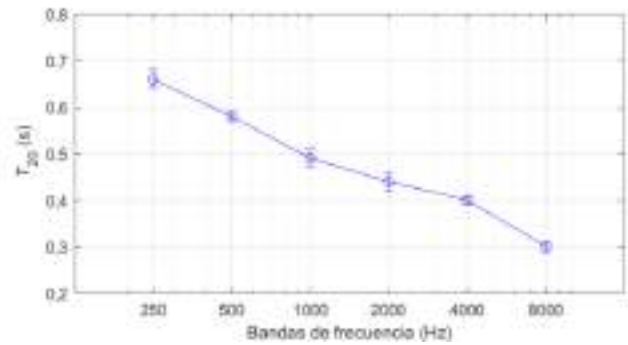


Figura 5. Promedio espacial del tiempo de reverberación medido en Palomas I. Las barras de error representan la dispersión en términos del error estándar de la media.

La Figura 5 muestra el comportamiento espectral de los valores del T_{20} promediados espacialmente (se omiten los resultados de la banda de 125 Hz debido a que su valor se considera impreciso). Puede apreciarse un cierto incremento a bajas frecuencias, lo que sugiere que el espacio añade calidez al sonido [29]. Este realce habría sido particularmente evidente en situaciones en las cuales alguna ceremonia hubiese involucrado cánticos guturales o instrumentos de percusión con significativas componentes de baja frecuencia.

Incluso en las posiciones más alejadas de la fuente, las fuertes reflexiones tempranas producidas por las superficies rocosas que se encuentran en las proximidades de las diferentes zonas de audiencia contribuyen al aumento del nivel efectivo del sonido emitido, mejorando si cabe la claridad con la que el sonido es percibido en el espacio ($C_{80m} > 6,25$, $D_m \geq 0,6$ y $T_{Sm} \leq 50$ ms) [30]. Es importante matizar, que, a pesar de que los elevados valores de C_{80m} obtenidos sugieren que el espacio no enturbia la apreciación de las diferentes notas que componen una pieza rítmica, no se puede afirmar que esta característica por sí misma pudiese haber motivado o favorecido la reproducción de piezas musicales durante de las actividades sociales o rituales acontecidas en la cueva.

Por otro lado, el espacio parece amplificar considerablemente el nivel sonoro subjetivo, dando lugar a valores de fuerza acústica, G_m , muy por encima de los esperados en campo libre para esa misma fuente sonora (Figura 6). Esta capacidad de “amplificación natural” de la cavidad también incrementa la percepción de otras cualidades acústicas, como la intimidad y la impresión espacial [31-32]. Precisamente, los resultados de los coeficientes de correlación cruzada interaural muestran que los oyentes experimentan la sensación de estar envueltos por sonido (1-IACC_{Lm} $\geq 0,81$) en las posiciones más alejadas de las aperturas, percibiendo además la fuente sonora más amplia (1-IACC_{Em} $\geq 0,72$).

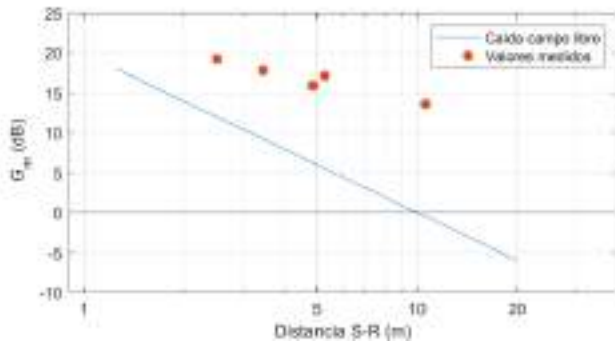


Figura 6. Valor promedio espectral de la fuerza acústica obtenida a partir de las respuestas al impulso registradas en Palomas I.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el estudio arqueoacústico de Palomas I. Se ha registrado *in situ* un set representativo de respuestas al impulso con el objetivo de recuperar y preservar el patrimonio sonoro inmaterial de este sitio de arte rupestre, y también de analizar la acústica del espacio y su posible influencia en las prácticas que las sociedades prehistóricas llevaron a cabo en este espacio.

Los resultados sugieren que, en caso de que el sonido hubiese formado parte de las actividades sociales y rituales que probablemente tuvieron lugar en Palomas I durante el Neolítico y Calcolítico, momento en el que se realizaron las pinturas post-paleolíticas, la acústica de la cueva, definida por un bajo tiempo de reverberación y un importante número de reflexiones tempranas, podría haber potenciado la sensación de intimidad y involucramiento en el espacio, añadiendo además cierta calidez y amplificación subjetiva al sonido. Asimismo, tanto el discurso hablado como cantado hubiera sido claramente percibido en todas las posibles zonas en las que hubieran podido concentrarse los oyentes.

Las respuestas al impulso espaciales registradas en Palomas I se utilizarán para generar auralizaciones, que servirán no solo para difundir el patrimonio sonoro de la cueva, si no para continuar analizando la percepción acústica dentro de la misma, esta vez utilizando test psicoacústicos y neuroacústicos (ver, por ejemplo [33]).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación forma parte del proyecto Artsoundscapes Advanced ERC (Grant Agreement No. 787842, Investigadora principal: ICREA Research Professor Margarita Díaz-Andreu) financiado por el European Research Council (ERC) bajo el European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. El trabajo de campo se realizó con el pertinente permiso de la Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico de la Junta de Andalucía (202199900646587—05/04/2021). Agradecemos

encarecidamente la valiosa ayuda recibida por parte de Laura Fernández Macías y nuestros colegas del PAIDI HUM-812 de la Universidad de Cádiz, con especial mención a Francisco Torres Abril; durante las diferentes fases del trabajo de campo.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

La versión 01 del data set “ERC Artsoundscapes project—Acoustic measurements at Palomas I” puede descargarse en <https://doi.org/10.34810/data855>

Las señales están disponibles bajo Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> (enlace consultado el 08 de septiembre de 2023).

REFERENCIAS

- [1] G. Laue y J.C. Dean, “Rock Art Conservation with a Focus on Southern Africa,” *Oxford Research Encyclopedia of Anthropology*, 2022.
- [2] S. Ouzman “Seeing is deceiving: rock art and the non-visual” *World archaeology*, vol. 33, pp. 237-256, 2001
- [3] C. Scarre y G. Lawson (eds.), *Archaeoacoustics*, McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge, 2006
- [4] A. Glory, “La Grotte du Roucadour (Lot)”, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 1964.
- [5] I. Reznikoff, “Sur la dimension sonore des grottes à peintures du Paléolithique”, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol 304 pp. 53-56, 307-310, 1987.
- [6] M. Dauvois y X.Boutillon, “Etudes acoustiques au Réseau Clastres: salle des peintures et lithophones naturels. Préhistoire, art et sociétés”, *Bulletin de la Société Préhistorique de l'Ariège-Pyrénées*, vol 45, pp. 175-186, 1990.
- [7] T. Mattioli et al., “Echoing landscapes: echolocation and the placement of rock art in the Central Mediterranean”, *Journal of Archaeological Science*, vol. 83, pp. 12-25, 2017.
- [8] B. Fazenda et al., “Cave acoustics in prehistory: Exploring the association of Palaeolithic visual motifs and acoustic response”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 142, n.º 3, pp. 1332-1349, 2017.
- [9] R. Rainio , A. Lahelma, T. Äikäs, K. Lassfolk y J. Okkonen, “Acoustic measurements and Digital Image Processing suggest a link between sound rituals and sacred sites in northern Finland”, *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 25, pp- 453-474, 2018.
- [10] H. Breuil y M.C. Burkitt, “Rock Paintings of Southern Andalusia. A Description of a Neolithic and Copper Age Art Group,” *Clarendon Press*, pp. 51-53, lámina XIX, 1929.
- [11] U. Topper y U. Topper, “Arte rupestre prehistórico en la provincia de Cádiz”, *Diputación Provincial de Cádiz*, 1988.
- [12] M. Mas, “Documentación e investigación de las manifestaciones artísticas en las cuevas de Palomas, abrigos de Bacinete y conjunto rupestre del Tajo de las Figuras (Cádiz)”, *Anuario Arqueológico de Andalucía II*, 1991.
- [13] M. Solís Delgado, “La pintura rupestre en el entorno de la Laguna de la Janda: Sierra del Niño (Cádiz). Cambio cultural, arte y paisaje”, *Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Prehistoria y Arqueología*, pp. 220-275, 2015.
- [14] D. Fernández-Sánchez, H. Collado Giraldo, E. Vijande Vila, S. Domínguez-Bella, A. Luque Rojas, J. J. Cantillo Duarte, H. A. Mira, S. Escalona, J. Ramos-Muñoz, “A contribution to the debate about prehistoric rock art in Southern Europe: New Palaeolithic motifs in Cueva de las Palomas IV, Facinas (Tarifa, Cádiz, Spain)”, *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 38, 2021.

- [15] ISO 3382-1, “Acoustics-Measurement of Room Acoustic Parameters— Part 1: Performance Spaces”, *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*, 2009.
- [16] R. Till, "Sound Archaeology: A Study of the Acoustics of Three World Heritage Sites, Spanish Prehistoric Painted Caves, Stonehenge, and Paphos Theatre", *Acoustics*, vol. 1, n.º 3, pp. 661–692, 2019.
- [17] D. Paini, A.C. Gade, J.H. Rindel, “Is Reverberation Time Adequate for Testing the Acoustical Quality of Unroofed Auditoriums?”, *Institute of Acoustics: Copenhagen, Denmark*, vol. 28, pp. 66–73, 2011.
- [18] A. Astolfi, E. Bo, F. Aletta y L. Shtrepi, "Measurements of Acoustical Parameters in the Ancient Open-Air Theatre of Tyndaris (Sicily, Italy)", *Applied Sciences.*, vol. 10, n.º 16, pp. 5680, 2020.
- [19] L. Alvarez-Morales, N. Santos da Rosa, D. Benítez-Aragón, L. Fernández Macías, M. Lazarich y M. Díaz-Andreu, "The Bacinete Main Shelter: A Prehistoric Theatre?", *Acoustics*, vol. 5, n.º 1, pp. 299–319, 2023.
- [20] Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis (EASERA), *AFMG Technologies GmbH, Germany www.afmg.eu*
- [21] D. Benítez-Aragón, A. Farina, L. Álvarez-Morales y M. Díaz-Andreu, "ERC Artsoundscapes project – SIMO (Single Input Multiple Output) impulse responses processing", *CORA. Repositori de Dades de Recerca*, VI, <https://doi.org/10.34810/data629>, 2023.
- [22] I. Mateljan, “Arta software User manual. Program for Impulse Response Measurement and Real Time Analysis of Spectrum and Frequency Response. Version 1.9.3”, *Artlabs, Croatia*, 2019.
- [23] L. Alvarez-Morales, N. Santos da Rosa, D. Benítez-Aragón, M. Lazarich y M. Díaz-Andreu, “Recovering the intangible acoustic heritage of rock art sites: El Tajo de las Figuras as a case study”, in *Proc. of the International Conference on Immersive and 3D Audio (I3DA)*, (Bologna, Italia), 2023 (En proceso de publicación)
- [24] N. Santos da Rosa, L. Alvarez-Morales, X. M. Briz, L. F. Macías y M. Díaz-Andreu, "The Acoustics of Aggregation Sites: Listening to the Rock Art Landscape of Cuevas de la Araña (Spain)", *Journal of Field Archaeology*, vol. 48, pp. 130-143, 2023.
- [25] <https://plugins.iem.at/>, accessed on 15 June 2023.
- [26] J. S. Bradley, “Acoustical design of rooms for speech”, *Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada*, 2002.
- [27] ISO 3382-2, “Acoustics-Measurement of Room Acoustic Parameters— Part 2: Reverberation Time in Ordinary Rooms”, *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*, 2008
- [28] B. F. G. Katz, “In-situ calibration of the sound strength parameter G,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, no. 2, pp. EL167– EL173, 2015
- [29] L. Beranek, “Concert and Opera Halls: How They Sound”, *Acoustical Society of America*, 1996.
- [30] J. S. Bradley, H. Sato y M. Picard, “On the importance of early reflections for speech in rooms”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113(6), pp. 3233-3244, 2003.
- [31] T. Hidaka, L. Beranek y T. Okano, "Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, n.º 2, pp. 988–1007, 1995.
- [32] T. Okano, L. Beranek y T. Hidaka, "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, n.º 1, p. 255–265, 1998.
- [33] S. López-Mochales, R. Aparicio-Terrés, M. Díaz-Andreu, y C. Escera, “Acoustic perception and emotion evocation by rock art soundscapes of Altai (Russia)”, *Frontiers in Psychology*, vol. 14, art. 1188567, 2023.

ACÚSTICA DEL AUDITORIO DE LOS JAMEOS DEL AGUA - LANZAROTE

Manuel M. Medina-Molina^{1}*
Jesús B. Alonso-Hernández¹

¹Departamento de Señales y Comunicaciones – DSC, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica – EITE, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria – ULPGC

RESUMEN

El uso de cuevas como escenario acústico es una práctica cultural y artística que existe en diferentes partes del mundo. Estos espacios naturales ofrecen características acústicas peculiares que pueden marcar la experiencia auditiva de un concierto, actuaciones teatrales u otras manifestaciones artísticas.

Jameo es un término del léxico canario que define una estructura geológica conformada por un conjunto de cavidades conectadas, cuevas y tubos de lava, que se crean durante las erupciones volcánicas. Estas estructuras configuran un recinto acústico con características peculiares que permite crear experiencias sonoras específicas y envolventes.

Los Jameos del Agua es uno de los proyectos emblemáticos del arquitecto César Manrique, un complejo turístico y cultural construido en una serie de jameos naturales dotado de un auditorio natural interior donde se celebra el “Jameos Music Festival”, entre otros.

Nuestro trabajo de medidas in situ proporciona la caracterización acústica de este recinto singular y ofrece los valores acústicos típicos que puedan facilitar su utilización apropiada según el tipo de música a interpretar.

ABSTRACT

The use of caves as acoustic settings is a cultural and artistic practice that exists in different parts of the world. These natural spaces offer peculiar acoustic characteristics that can mark the listening experience of a concert, theatrical performances, or other artistic manifestations.

Jameo is a term from the Canarian lexicon that defines a geological structure made up of a set of connected cavities, lava tubes, which are created during volcanic eruptions. These structures configure an acoustic enclosure with peculiar characteristics that allow the creation of specific and immersive sound experiences.

Los Jameos del Agua is one of the emblematic projects of architect César Manrique, a tourist and cultural complex built in a series of natural jameos equipped with a natural interior auditorium where the “Jameos Music Festival” is celebrated, among others.

This in-situ measurement work provides the acoustic characterization of this unique venue and offers the typical acoustic values that can facilitate its appropriate use according to the type of music to be performed.

Palabras Clave— cuevas, acústica arquitectónica, sala sinfónica, cave, room acoustics,

1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, la utilización de cuevas naturales como centros de recreo para el disfrute de la población es muy común [1]. Muchas de ellas son, además, utilizadas como auditorios naturales para la música. Posiblemente, la Cueva de Postojna en Eslovenia sea la más famosa y visitada en todo el mundo. En España podemos destacar la Cueva del Drach y la Cueva de Nerjaen.

Un Jameo (léxico canario) es una estructura geológica creada del agujero por hundimiento en la bóveda de un tubo volcánico. En la isla de Lanzarote se encuentra el espacio natural, centro de arte y turístico denominado Jameos del Agua [2]. Esta estructura geológica surge como fruto de la erupción del Volcán de la Corona hace unos 3000 años y es aprovechada por la mente privilegiada del arquitecto Cesar Manrique, en los años 70 del pasado siglo, para diseñar un centro turístico y recreativo con auditorio [3].

Los Jameos del Agua se encuentran situados en la sección del túnel volcánico más cercana a la costa y está constituida por varias estructuras independientes que contienen jardines con especies tropicales, fauna acuática endémica y una piscina. En uno de esos tubos volcánicos se dispone, desde 1976, de un auditorio adaptado y acondicionado, el mayor de Europa de estas características,

* *Autor de contacto:* manuel.medina@ulpgc.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

donde se celebra, entre otros, el famoso “Festival de música de Lanzarote” y el “Jameos Music Festival”.

Desafortunadamente, el auditorio natural de los Jameos del agua permanece cerrado con bastante frecuencia debido a inestabilidades estructurales detectadas en la cueva fruto del proceso de degradación natural.

El presente trabajo está basado en las medidas obtenidas para la realización de dos proyectos final de carrera en la EITE de la ULPGC [4][5].

2. EL AUDITORIO DE LOS JAMEOS DEL AGUA

El auditorio de los Jameos del Agua está construido en una cueva volcánica con dos espacios perfectamente definidos y diferenciados: La sala de audiencias y el escenario.

La sala de audiencia del auditorio, planta de 700 m² de unos 35 metros de largo y con capacidad máxima para unos 500 espectadores, se muestra en la Figura 1. El suelo del pasillo está cubierto con moqueta, el área de audiencia es de revoco de cemento blanco con asiento y respaldo cubierto de cojines de cuero negro. El techo y las paredes están formados por la estructura volcánica de piedra rugosa y porosa [4][5].



Figura 1. Vista del auditorio desde la sala de audiencia.

El escenario del auditorio, ver Figura 2, cuenta con una superficie útil de unos 200 m², de unos 18 metros de ancho, con suelo de madera y caja de piedra volcánica común en toda la sala [4][5]. Cuenta con una prolongación trasera, no visible al público de las filas intermedias, de unos 100 metros cuadrados culminados en una estructura de cristal que permite el paso de la luz natural.

La estructura de las paredes y el techo están contenidas en un tubo volcánico que se asemeja a un semicono circular dispuesto a lo largo del eje longitudinal del área de audiencias. El material de las paredes y el techo es piedra volcánica, material muy poroso y rugoso, conocido en canarias como maípez o malpaís.

La pared posterior de la sala, de unos 10 metros de alto y 9 de ancho, está revestida con cristal y culminada en su techo por una estructura en forma de claraboya que cubre el agujero de salida del jameo y permite el paso de la luz natural. Tras

el cristal de la pared posterior se encuentra una sala de proyección que dota al recinto con posibilidades audiovisual.

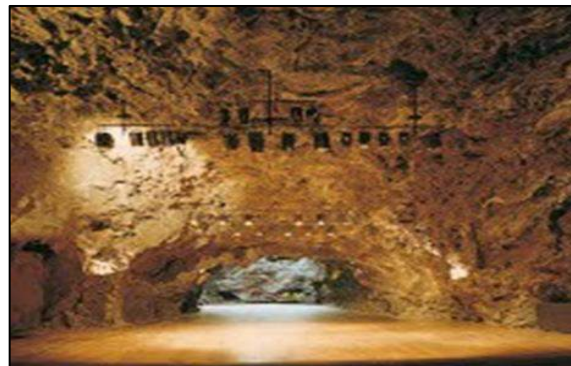


Figura 2. Escenario del Auditorio.

3. METODOLOGÍA

Para caracterizar la acústica del recinto se procedió a medir in situ el tiempo de reverberación según establece la norma EN-ISO 3382 mediante el software para medidas acústicas DIRAC 4 y el instrumental de excitación y captación apropiado. Este mismo software proporciona también algunos de los parámetros acústicos que aquí presentamos. La estación básica de medidas se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Estación básica de medidas [5].

Una vez calibrada, verificada y validada la estación básica se procedió a realizar un muestreo reticular del auditorio con más de 60 estaciones de medida en toda el área de audiencias, como se muestra en la Figura 4. Para enviar los datos al ordenador se empleó un enlace de radio UHF que demostró ser una herramienta muy útil debido a las dimensiones del recinto y la incomodidad de utilizar una línea de transmisión convencional.

Las medidas se realizaron utilizando señales MLS, barridos logarítmicos y también mediante pruebas con la detonación de globos, todo ello procesado por DIRAC como señales internas o externas. En todos los casos, la relación señal a ruido fue adecuada, aunque inexplicablemente baja para las señales MLS.



Figura 4. Muestreo de la sala de audiencia del auditorio [5].

4. RESULTADOS

Pasamos a continuación a mostrar, de forma muy sucinta, el resultado de las medidas realizadas. Los resultados completos podrá encontrarlos en [4] y [5].

4.1. Tiempo de reverberación

Los valores de los parámetros relacionados con el tiempo de reverberación, EDT y T30, muy uniformes en todos el recinto, se presentan promediados por octavas para toda la sala en la Tabla 1 y en la Figura 5.

Tabla 1. Valores promedio y desviación típica del tiempo de reverberación por octava.

Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]	1,00	0,98	1,03	1,03	0,96	0,77	0,56
<i>SD</i>	0,40	0,15	0,19	0,14	0,13	0,09	0,34
T30 [s]	1,13	0,93	0,90	0,86	0,76	0,63	0,44
<i>SD</i>	0,36	0,08	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03

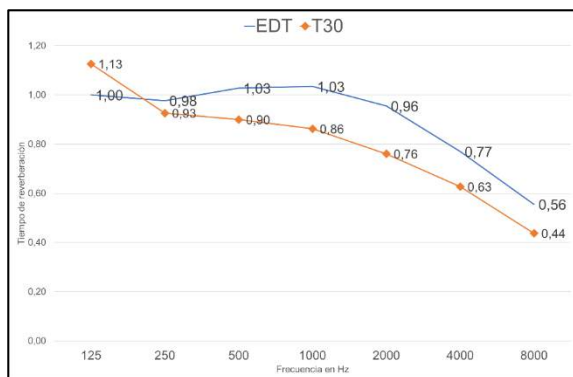


Figura 5. Espectro de reverberación.

4.2. Parámetros de energía: C50 y C80

La claridad para la palabra y para la música, descrita por los parámetros C50 y C80 (Average según Beranek) respectivamente, no ha podido ser promediada en toda la sala debido a la alta dispersión de resultados, especialmente a medida que nos alejamos del escenario. Por esta razón,

presentamos aquí sólo los valores de la primera en la Tabla 2 y la última fila en la Tabla 3, dejando al lector estimar la caída paulatina del valor del parámetro a medida que nos alejamos del escenario.

Tabla 2. Valores de C50 y C80 en primera fila, a 4 m. del escenario.

Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50 [dB]	3,8	3,3	3,9	4,4	8,9	7,9	7,0
C80 [dB]	4,6	6,5	6,3	7,0	11,2	10,6	9,5

Tabla 3. Valores de C50 y C80 en última fila, a 33 m. del escenario.

Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
C50 [dB]	-2,7	-3,2	-3,2	-3,1	-2,9	-1,7	-0,6
C80 [dB]	-2,4	-2,9	-3,0	-3,0	-2,8	-1,7	-0,6

4.3. Inteligibilidad

Las muestras tomadas han arrojado un valor de RASTI (Rapid Speech Transmission Index) promedio de 0,6 en toda la extensión de la sala. El valor máximo 0,74 se obtuvo en las primeras filas, como era de esperar, y se midió un mínimo de 0,56 en la última fila.

Con esos valores se determina un %Alcons (Percentage Articulation Loss of Consonants) promedio de 7%, con un mínimo de 3% en la primera fila y un 8% en la última.

4.4. Difusión sonora

Para caracterizar la difusión del sonido en el área de audiencia, una vez ubicada la fuente sonora en el escenario con emisión de ruido rosa a unos 100 dB (máximo de nuestro equipo), se procedió a medir en nivel sonoro espectral de recepción a 1m. de la fuente y a tomar medidas del nivel sonoro para diferentes distancias en el eje longitudinal de la sala. Los valores totales obtenidos se representan en la Figura 6.

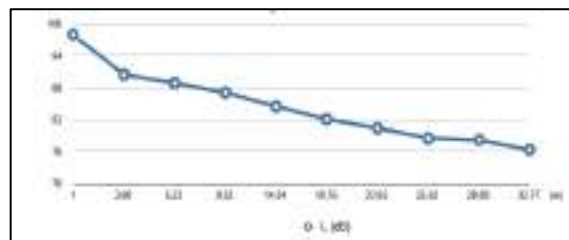


Figura 6. Caída del nivel acústico respecto a la fuente.

4.5. Ruido de fondo

La medida del ruido de fondo en diferentes posiciones de la sala nos permite caracterizar el recinto con una valoración NC-15 de las curvas Noise Criteria, como puede apreciarse en el espectro de ruido de la Figura 7, resultado del promedio de medidas en diferentes posiciones del área de audiencia y del escenario.

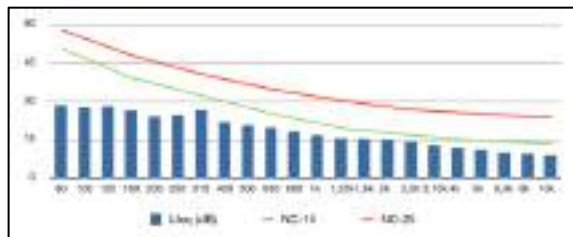


Figura 7. Espectro de ruido de fondo.

5. DISCUSIÓN

El tiempo de reverberación se revela como el parámetro acústico más estable en todas las estaciones de medida, con una desviación estándar de la medida en el orden de las centésimas, exceptuando la banda de 125 Hz que rondó el valor de 0,3. Esta característica muestra la acción de la principal superficie de absorción, las paredes y techo de la cavidad volcánica, que actúa como un excelente absorbente y difusor del sonido que fluye desde el escenario. Desde nuestro punto de vista, el valor promedio de T, inferior a 1 segundo excepto en la banda de 125 Hz, caracteriza el recinto como bastante “seco” y poco reverberante para el volumen de 6.000 metros cúbicos de la sala. Por otro lado, el valor de EDT superior a T30 en todo el espectro caracteriza un arribo rápido de la energía sonora y una cola de reverberación muy poco influyente en la peculiaridad acústica del recinto.

Con respecto a los parámetros de claridad C50 y C80 (Speech and Music average, en dB), queremos hacer constar la sorpresa por los datos medidos. Si bien dentro de una distancia al escenario menor a 10 metros los valores responden a las expectativas, valores superiores a 2 dB y 5 dB respectivamente, a partir de 15 metros estos valores se vuelven negativos, indicando un cierto deterioro de la claridad para la palabra y para la música en el fondo del auditorio. De cualquier forma, los valores de C80 son superiores a -3 dB y caracteriza una sala con una acústica muy aceptable en cualquier posición para música sinfónica. Los valores de C50 y C80 positivos y de valor superior a 2 dB en la cercanía del escenario caracterizan esa parte de la sala como excelente para la reproducción de actividades teatrales o de música “rápida” como el jazz, la música electrónica, etc.

Por otro lado, las medidas de la inteligibilidad para la palabra arrojan un valor de RASTI bastante aceptable en cualquier parte de la sala, con valores excelentes (0,74) para las primeras filas y un valor aceptable para las últimas filas (0,56).

La medida de la difusión sonora en el eje longitudinal del área de audiencia nos ayuda a comprender los fenómenos comentados anteriormente. Como puede apreciarse en la Figura 6, la influencia del campo reverberante es muy pobre en toda la sala debido a la porosidad y rugosidad de las paredes límite de la cueva volcánica, presentando una difusión de energía “casi” como la esperada para campo libre (a 30 metros del escenario el nivel total recibido cae 25 dB).

Ello explica los valores desiguales, próximos y distales, de la claridad C50 y C80 a lo largo del área de audiencia.

Con respecto al ruido de fondo, concluimos diciendo que los valores medidos son la envidia de cualquier gran auditorio, alcanzando una valoración NC-15 como hemos indicado en la Figura 7, que garantiza el gran confort acústico.

En otro orden de cosas, todas las medidas obtenidas permitieron validar el modelado del auditorio en el software EASE 4 (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers), ver Figura 8.

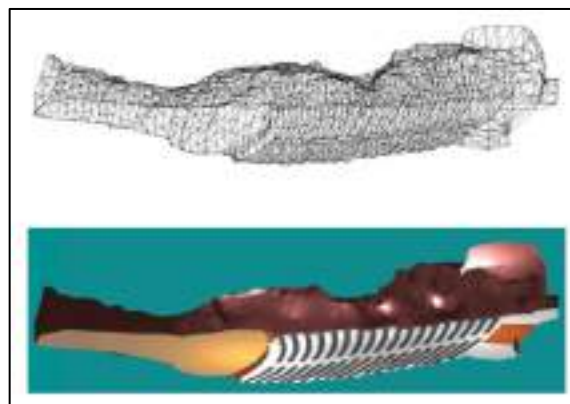


Figura 8. Modelo del auditorio en EASE [5].

Este modelo facilitó el estudio con mucho más detalle de las características geométricas de la acústica en el auditorio. Al mismo tiempo, permitió determinar con bastante precisión el valor del coeficiente de absorción de la piedra volcánica que es utilizada con bastante frecuencia en salas y estudios de grabación de sonido para conseguir una atmósfera libre de reflexiones (especialmente con instrumentos de viento y batería)

6. CONCLUSIONES

Desde nuestro punto de vista, los parámetros acústicos que hemos presentado permiten caracterizar el auditorio de los Jameos del Agua como una sala con unas altas prestaciones acústicas, similar a cualquier sala sinfónica del mismo volumen en cualquier parte del mundo. Si bien la baja reverberación general de la sala podría indicar un carácter un tanto “seco” para la reproducción de música sinfónica o de cámara, las medidas del tiempo de reverberación, la inteligibilidad, la claridad y la difusión del sonido la hacen especialmente adecuada para la reproducción de música moderna, rápida e incluso con alta presencia de graves.

Por otro lado, la atmósfera y el encanto del auditorio diseñado y creado por César Manrique en la estructura volcánica del jameo ofrecen la posibilidad a esta sala de convertirse en un marco inmejorable para la promoción cultural y turística de la isla de Lanzarote, que permitiría

ampliar su plan de actuaciones escénicas al teatro, el ballet, o generalizando su utilización como sala de conciertos.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Cabildo Insular de Lanzarote facilitarnos el acceso al centro turístico y conceder becas de transporte a los estudiantes.

También agradecemos la colaboración de los profesores de la ULPGC Eduardo Hernández Pérez y Juan Manuel Caballero Suárez y los estudiantes Luis Morín y Alejandro Ruiz.

8. REFERENCIAS

[1] Iannace, G., & Trematerra, A. (2014). The acoustics of the caves. *Applied Acoustics*, 86, 42–46.
<https://doi.org/10.1016/J.APACoust.2014.05.004>.

[2] Toponimia de Lanzarote - Jameo. (n.d.). Retrieved September 11, 2023, from
<http://toplanzarote.ulpgc.es//toponimo.php?id=898>.

[3] Intro - CÉSAR MANRIQUE LANZAROTE, ARQUITECTURA. (n.d.). Retrieved September 11, 2023, from
<https://manriquelanzarote.com/>.

[4] Morín García, L., & Caballero Suárez, J. M. (1999). Estudio acústico del Auditorium de Los Jameos del Agua en la isla de Lanzarote / Luis Morín García; Juan Manuel Caballero Suárez, dir. <http://bibcontentdm.ulpgc.es/u/?POSTULPGC,1382>.

[5] Ruiz Suárez, A., & Medina-Molina, M. M. (2011). Estudio acústico del auditorio Jameos del Agua - Haría, Lanzarote / Alejandro Ruiz Suárez; tutor Manuel Martín Medina Molina. <http://hdl.handle.net/10553/68699>



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

AUD-0 Audiología.



SISTEMA PARA LA MEJORA DEL CONFORT ACÚSTICO EN LAS INCUBADORAS NEONATALES (NICA+): RESULTADOS PRELIMINARES DEL PROTOTIPO

Ricardo Hernández-Molina^{1*}; Francisco Fernández Zacarías¹; Virginia Puyana-Romero^{1,2}; Juan Luis Beira Jiménez¹; Morgado-Estévez, Arturo³; Bienvenido-Bárcena, Rafael⁴

¹Laboratorio de ingeniería Acústica, Universidad de Cádiz, Cádiz, España; Edificio CASEM; Campus de Puerto Real; Universidad de Cádiz; Avda. de la Universidad de Cádiz s/n; 11515 Puerto Real, Cádiz. Teléfonos: + 34 956 019108

²Grupo de Investigación de Ambientes Acústicos, Departamento de Ingeniería del Sonido y Acústica, Campus Granados, Universidad de las Américas, Quito 170125, Ecuador:

³Departamento Ingeniería en Automática, Electrónica, Arquitectura y Redes de Computadores; Escuela Superior de Ingeniería ESI Avenida de la Universidad n° 10 11519 Puerto Real, Cádiz.

⁴Departamento Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial; Departamento Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial; Escuela Superior de Ingeniería ESI Avenida de la Universidad n° 10 11519 Puerto Real, Cádiz. ricardo.hernandez@uca.es; francisco.fernandez@gm.uca.es; virginia.puyana@uca.es; jluis.beira@uca.es; arturo.morgado@uca.es; rafael.bienvenido@uca.es

RESUMEN

En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre el prototipo(NICA+) realizado en el laboratorio de Ingeniería Acústica en colaboración con los laboratorios de Robótica/electrónica y diseño industrial de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz.

Se han analizado los niveles de presión sonora, tanto en el interior como en el exterior, en tres modelos diferentes de incubadoras y en el prototipo: “Neonatal Incubators Comfort Acoustic Class (NICA+)”.

Los resultados obtenidos muestran variaciones entre los diferentes modelos de incubadoras, aunque globalmente son valores elevados (alrededor de 56/60 dBA), demuestran que los recién nacidos prematuros, en condiciones normales de uso de estas incubadoras, están expuestos a niveles de ruido por encima de las recomendaciones internacionales.

Los resultados obtenidos en el prototipo NICA+, son alentadores y ponen de manifiesto la bondad de la propuesta de diseño y mejora del confort acústico de las incubadoras neonatales, los valores obtenidos demuestran que, los recién nacidos prematuros, en condiciones normales de uso del prototipo de incubadora NICA+, pueden estar expuestos a niveles de ruido por debajo de las recomendaciones internacionales.

ABSTRACT

This communication presents the results obtained in the tests carried out on the prototype (NICA+) carried out in the Acoustic Engineering laboratory in collaboration with the Robotics/electronics and industrial design laboratories of the Higher School of Engineering of the University of Cádiz.

The sound pressure levels have been analyzed, both inside and outside, in three different models of incubators and in the prototype: “Neonatal Incubators Comfort Acoustic Class (NICA+)”.

The results obtained show variations between the different models of incubators, although overall they are high values (around 56/60 dBA), they demonstrate that premature newborns, under normal conditions of use of these incubators, are exposed to noise levels above of international recommendations.

The results obtained in the NICA+ prototype are encouraging and show the goodness of the design proposal and improvement of the acoustic comfort of the neonatal incubators. The values obtained demonstrate that premature newborns, under normal conditions of use of the prototype NICA+ incubator, may be exposed to noise levels below international recommendations.

Palabras Clave— Neonatos, presión sonora, incubadora, fuente de ruido, UCIN.

* **Autor de contacto:** primer.autor@miemail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 De la incubadora

En 1929, Julius H. Hess [1] presentó una de las primeras propuestas de incubadoras, con la referencia US1900342A y concedida la patente en 1933. Esta invención se refiere a incubadoras infantiles, y tiene por objeto producir una incubadora que comprende una cuna adaptada y un dosel removible por lo que dicha cuna puede convertirse en una incubadora para uso de bebés prematuros o delicados.

En agosto de 1967 JR, Grosholz et al [2], presentó el esquema funcional más difundido, adoptado por varios fabricantes para el diseño de incubadoras. Se basa en un sistema compuesto por un circuito de ventilación para la transferencia de calor por convección y la ganancia de humedad por el paso de aire a través de un recipiente contenedor en el mismo circuito de flujo de ventilación, descrito en la patente US3335713A

1.2 De la regulación

En general, la regulación térmica es uno de los factores críticos en la supervivencia y estabilidad de los recién nacidos [3]. La mayoría de las incubadoras mantienen la temperatura de los bebés mediante el flujo de aire caliente, este calor se transfiere principalmente por convección. Los sistemas de calefacción y humidificación están localizados debajo del compartimento de la incubadora. La circulación del aire se logra gracias a un ventilador o a una turbina que lo toma del exterior y lo pasa a través de un elemento calefactor y de un dispositivo de medición de temperatura, posteriormente pasa sobre un depósito de agua utilizado para humedecer el aire (si es que se requiere) antes de impulsarlo hacia el interior de la cámara donde se encuentra el paciente. Desde la primera incubadora infantil, (1929) a la actualidad, todas las mejoras implementadas se han centrado en mejorar este sistema.

1.3 De los avances

Los avances en control de los niveles de ruido generados por la propia incubadora, son mucho más recientes. En 2013 la universidad del norte de Illinois presento la patente US20130204617A1 [4], que plantea un aparato, sistema y método para cancelación de ruido y comunicación para incubadoras y dispositivos relacionados. Desde entonces a la actualidad en este campo existen patentes orientadas al control activo/pasivo del ruido generado en el interior de las incubadoras, unas orientadas a la cancelación del mismo y otras a la generación de un ambiente sonoro proactivo para el neonato prematuro en el que se intenta recrear el ambiente existente en el útero materno. En 2014, la patente WO2015029044A2 [5] introduce un sistema de amortiguación de ruido basado en un módulo de atenuación acústica, que a partir de uno o varios sensores detecta las características del sonido, y genera una interferencia destructiva de ese sonido.

Estudios de medidas de ruido en el interior de la incubadora muestran que las principales fuentes de ruido provienen de la circulación de aire y/o motores, bombas y ventiladores que soportan varios mecanismos de soporte vital, las alarmas de los distintos monitores y aparatos de mantenimiento, el llanto del recién nacido apertura y cierre de puertas y las conversaciones de los profesionales próximos a la incubadora [6]. Muchos ruidos incluso se amplifican dentro de una incubadora, como el ruido generado por CPAP (presión positiva continua en las vías respiratorias) debido al espacio cerrado.

1.4 Del confort interior

Un aspecto importante a tener en cuenta para el confort del neonato en la incubadora es el nivel de ruido en su interior. El sonido dentro de una incubadora moderna, especialmente a bajas frecuencias, pueden alcanzar niveles que probablemente sean dañinos para el recién nacido en desarrollo. Gran parte del ruido se encuentra en bajas frecuencias y, por lo tanto, es difícil de reducir por medios convencionales [7].

El ambiente sonoro en el interior del habitáculo está influenciado por los propios materiales de la cubierta, estos suelen ser materiales acrílicos (metacrilatos) y tienen aproximadamente 6mm de grosor, suficientes para aislar el ambiente externo del microambiente de la incubadora [8]. Su influencia en el ambiente sonoro que genera en su interior tiene su origen en las propiedades acústicas de esos materiales. Son altamente reflexivos y si bien son los responsables de aislar al bebé y crear una barrera entre el ambiente externo y el microambiente generado por la incubadora, protegiéndolo de situaciones como corrientes de aire y bajas temperaturas, también es cierto que favorece un ambiente reverberante que amplifica los ya de por sí elevados niveles de ruido generados por los propios dispositivos de la incubadora. Este hecho es alarmante en los bebés prematuros, y podría causarles una pérdida auditiva neurosensorial [9]. En este sentido, los prematuros tienen una respuesta reducida a la estimulación auditiva en comparación con los nacidos a término [10].

Aunque se conocen recintos de múltiples paredes, la mayoría de los recintos son transparentes a los sonidos que se encuentran en las inmediaciones del recinto y, por lo tanto, aumentan el nivel de sonido presente en los oídos del niño [11]. Se ha podido constatar que, en el desarrollo tecnológico de estos dispositivos no se ha tenido en cuenta los niveles de ruido que los mismos proporcionan.

El daño provocado por el ruido depende de forma significativa de factores objetivos como la frecuencia, intensidad, tiempo de exposición y el tiempo de reposo acústico, así como de factores subjetivos como la susceptibilidad del paciente [12]. Así pues, los neonatos prematuros son más susceptibles a los efectos del ruido ambiente que los nacidos a término. A menor edad

gestacional, mayor es el compromiso, ya que el desarrollo cerebral no está completo y aumenta el riesgo de maduración cerebral anormal [13]. La discapacidad auditiva se diagnostica entre el 2% al 10% de los bebés prematuros frente al 0,1% de la población pediátrica general [14].

1.5 Del entorno

En el entorno UCIN, se ha podido observar que los niveles de presión sonora oscilan en el interior de las incubadoras los niveles entre los 44,2 dBA (L_{min}) y los 84,2 dBA (L_{max}) siendo $L_{Aeq(24\ h)}$ de 50,4 dBA. Se ha podido encontrar actividades con picos (L_{Cpeak}) cercanos a los 108,3 dBC. Los niveles más altos se encuentran en baja frecuencia, permaneciendo por debajo de los 45 dBA a partir de los 250 Hz [15].

El entorno sonoro de la UCIN es ruidoso y contiene ruidos molestos de corta duración y a intervalos irregulares que a menudo exceden el nivel máximo aceptable de 45 decibelios (dB) [16], recomendado por la American Academy of Pediatrics (AAP). La mayor parte del ruido dentro de la incubadora proviene de fuentes externas a la incubadora. Así, aunque el nivel medio de ruido en las UCIN más modernas ronda los 62 dBA, distintas pruebas realizadas en estas dependencias muestran que el ruido exterior a la incubadora puede llegar a alcanzar niveles máximos de 88,8 dBA frente a los 84,1 dBA del interior [17]. Sin embargo, en general, la mayoría de los estudios revelaron ruidos medios entre 55 dBA y 67 dBA y ruidos de impulso por encima de 140 dB (golpes de la incubadora para estimular al prematuro apneico). Por otro lado, los ruidos generados durante el manejo de las incubadoras oscilan entre los 72,5 dB (colocando el biberón de fórmula encima de la incubadora) y los 98,4 dB (cierres de las aberturas laterales).

Proporcionar un ambiente adecuado en la UCIN es imprescindible ya que los neonatos ingresados en estas salas nacen prematuros, con bajo peso y/o con graves problemas de salud [18]. Según la AAP, la exposición a niveles de ruido por encima de 45 dBA puede provocar daños cocleares o incluso interrumpir el crecimiento y desarrollo normal del neonato [19]. Es por ello que la AAP recomienda que las áreas de cuidados neonatales deben incluir unidades de absorción acústica u otros medios para garantizar que la combinación de ruido de fondo continuo y sonidos transitorios en cualquier área del cuidado del paciente no exceda un nivel de ruido acumulado (L_{Aeq} por hora) de 45 dBA, un nivel (L_{10}) de 50 dBA y un nivel máximo (L_{max}) que no debe exceder los 65 dBA [20].

1.6 De las recomendaciones

En la actualidad, el límite de nivel de ruido en el interior de la incubadora está marcado por la UNE-EN 60601-2-19 (Equipos electromédicos. Parte 2-19: Requisitos particulares para la seguridad básica y funcionamiento esencial de las incubadoras de bebé) [21]. La cual indica que en condiciones normales de funcionamiento (temperatura de mando de 36°C

y humedad máxima), el nivel sonoro en el interior del habitáculo del bebé no debe exceder un nivel de presión acústica de 60 dBA y cuando cualquier alarma de la incubadora esté sonando, el nivel sonoro en el habitáculo del neonato no debe exceder de 80 dBA [22].

Aunque la misma norma hace referencia a lo indicado por la AAP, indica que no es prudente mantener a los neonatos prematuros en entornos sonoros ambientales superiores a 50 dB(A), por lo que, a modo de recomendación, hace hincapié a los fabricantes en la necesidad de conseguir que los niveles sonoros del habitáculo de la incubadora sean compatibles con los 45 dBA recomendados por la AAP [19] y los 30 dBA recomendados por la OMS hace ya más de treinta años [23].

En el ámbito de la legislación que pudiese ser aplicable a la dosis de ruido a la que se podrían ver sometidos los pacientes neonatos, se debe tener en cuenta el cálculo descrito en la NTP 270 [24], sin olvidar la recomendación de la AAP, recordando que no es prudente mantener a los neonatos prematuros en entornos sonoros ambientales superiores a 45 dB(A).

1.7 Del prototipo

El problema técnico a resolver es el de disponer de una incubadora, en funcionamiento, en cuyo interior se cuente con el aire a la presión y flujo necesarios, con las condiciones de temperatura y humedad que requieren este tipo de unidades médicas, sin que la introducción del aire y su acondicionamiento generen ruidos ni vibraciones en su interior, al tiempo que se proporciona un habitáculo para contener al neonato que produce una reducción efectiva de los ruidos del exterior. Garantizando las recomendaciones proporcionadas por los organismos internacionales como la AAP y la OMS, entre otros.

El laboratorio de ingeniería acústica, en colaboración con los departamentos de Ingeniería en Automática, Electrónica, Arquitectura y Redes de Computadores; y el Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial; de la Escuela Superior de Ingeniería (ESI) de la Universidad de Cádiz ha desarrollado un prototipo, presentado en forma de patente en la OEPM P202330766. [25], consistente en una incubadora con sistema para la mejora del confort acústico del neonato.

El objetivo de este trabajo es el de presentar los resultados preliminares, obtenidos en condiciones de campo libre, en cámara semianecoica del prototipo que se ha desarrollado. Estos resultados se comparan con los obtenidos en las mismas condiciones de trabajo en tres modelos de incubadoras, proporcionadas por el servicio neonatal de la unidad de cuidados intensivos del Hospital Universitario “Puerta del Mar” de Cádiz y que fueron publicados en trabajos anteriores [26], [27]

2. METODOLOGIA.

2.1 Instrumentación empleada

Para llevar a cabo las medidas se han utilizado los sonómetros: 2270 y 2250 y el calibrador modelo 4231 de Brüel & Kjaer. Antes de realizar las mediciones, todo el equipo fue previamente verificado y calibrado. En todos los casos se tomaron los datos de las condiciones ambientales: Temperatura, presión y humedad, en ambas cámaras.

Los datos registrados se procesaron empleando el software Evaluator Type 7820 de Brüel & Kjaer, con la aplicación BZ7225 Versión 4.7.4 y Microsoft Excel.

2.2. Procedimiento de medida

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre el prototipo realizado en el laboratorio de Ingeniería Acústica en colaboración con los laboratorios de Robótica/electrónica y diseño industrial de la Escuela Superior de Ingeniería (UCA).

Los ensayos se han realizado en la cámara semianecoica del laboratorio de Ingeniería Acústica bajo la norma: UNE-EN ISO 3745:2012/A1:2018.

Se han definido tres modos de funcionamiento diferentes: Situación parada, funcionamiento normal y con alarma de temperatura en las incubadoras del de la UCIN del Hospital Universitario “Puerta del Mar” (Cádiz, España).

Se han analizado los niveles de presión sonora, tanto en el interior como en el exterior, en diferentes modelos de incubadoras y del Prototipo Neonatal Incubators Comfort Acoustic Class (NICA+). Los modelos de incubadoras, han sido proporcionados por el servicio neonatal de la unidad de cuidados intensivos del Hospital Universitario “Puerta del Mar” de Cádiz y fueron: La Incubadora OHMEDA OHIO, Care Plus; la Incubadora DRÄGER Caleo; la Incubadora OHMEDA GIRAFFE. (Figuras 1,2 y 3)

Se han analizado los niveles de presión sonora, tanto en el interior como en el exterior, registrando los siguientes valores: $L_{Aeq,Ti}$, $L_{Ceq,Ti}$, $L_{Aeq,Ti}$, $L_{Aeq,Ti}$, $L_{Ceq,Ti}$, $L_{Aeq,Ti}$, L_{AFmax} , L_{AFmin} , L_{10} , L_{50} , y el L_{90} .



Figura 2: Incubadora



Figura 1: Incubadora

Se obtuvieron los valores en bandas de frecuencia en tercios de octava, de 12,5 Hz a 20 KHz.

Para el análisis de los datos, se ha tomado el valor del $L_{Aeq,Ti}$, de mayor nivel de los obtenidos en las cuatro posiciones del micrófono exterior, para el ruido de fondo se ha tomado el valor del $L_{Aeq,Ti}$, de menor nivel de los obtenidos en las cuatro posiciones del micrófono exterior.



Figura 3: Incubadora OHMEDA

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran variaciones entre los tres modelos de incubadoras, aunque globalmente son valores elevados (alrededor de 56/60 dBA) en condiciones normales.

La influencia de la alarma puede empeorar considerablemente estos datos. Los valores obtenidos muestran que los recién nacidos prematuros, en condiciones normales de uso de estas incubadoras, están expuestos a niveles de ruido por encima de las recomendaciones internacionales. Debemos indicar que los valores relativos a los tres modelos de incubadoras son los presentados y publicados en nuestros últimos trabajos [26], [27]

3.1. Ruido de fondo (incubadoras paradas)

Con el objeto de obtener el ruido de fondo existente fuera y dentro de la incubadora, se midieron en situación de “parada” los tres modelos de incubadora y el prototipo, situados en el interior de la cámara semianecoica. Los resultados se muestran en la siguiente tabla [Tabla 1].

Podemos observar que en cuanto a ruido de fondo las diferencias son muy pequeñas. De media se obtiene un valor de $L_{Aeq,Ti}$, de 18 dBA en el exterior y de 17 dBA en el interior.

Tabla 1. Incubadoras paradas (ruido de fondo) Cámara semianecoica

Modelo de Incubadora	Exterior (2250) [dBA]							
	$L_{Aeq,Ti}$	$L_{Ceq,Ti}$	$L_{Aeq,Ti}$	L_{AFmax}	L_{AFmin}	L_{10}	L_{50}	L_{90}
01 Care Plus Rever	17,8	35	17,8	18,2	17,5	17,9	17,5	17,1
02 Dräger Medical	17,8	35,7	17,8	18,8	17,5	18,0	17,8	17,6
03 Giraffe	17,8	34,0	17,8	18,4	17,5	18,0	17,8	17,6
Prototipo NICA+	17,75	32	17,77	18,42	17,46	17,94	17,74	17,62
Modelo de Incubadora	Interior (2270) [dBA]							
	$L_{Aeq,Ti}$	$L_{Ceq,Ti}$	$L_{Aeq,Ti}$	L_{AFmax}	L_{AFmin}	L_{10}	L_{50}	L_{90}
01 Care Plus Rever	17,7	42,7	18,9	27,6	16,5	17,8	17	16,2
02 Dräger Medical	16,9	36,6	17,1	19,9	16,5	17,1	16,8	16,6
03 Giraffe	17,0	34,3	17,1	19,1	15,8	17,2	17,0	16,8
Prototipo NICA+	16,87	35,87	17,08	19,16	16,38	17,19	16,79	16,61

Las condiciones de ruido de fondo obtenidas durante los distintos ensayos han sido similares a partir de la frecuencia de 200 Hz, sin embargo, a frecuencias inferiores y debido a las características físicas de la propia cámara semianecoica, éstas pueden variar mínimamente de un ensayo a otro.

Teniendo en cuenta la frecuencia de corte declarada en la propia cámara, se podría relacionar el efecto antes comentado con esta característica.

En estas condiciones de medición, se observa que los niveles de presión sonora en tercio de octavas (interior/exterior) son muy parecidos a los reflejados en la cámara semianecoica, atenuados por los paramentos que conforman el habitáculo de la incubadora.

3.2. Incubadora funcionando

Con el objeto de obtener los valores de presión sonora tanto el interior como en el exterior de la incubadora, se midieron en situación de “funcionando” cada uno de los tres modelos de incubadora y en el prototipo, situados en la cámara semianecoica. En estas condiciones los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla [Tabla 2].

Tabla 2. Incubadoras funcionando Cámara semianecoica

Modelo de Incubadora	Exterior (2250) [dBA]								
	L _{Aeq,Ti}	L _{Ceq,Ti}	L _{Aeq,Ti}	L _{AFmax}	L _{AFmin}	L ₁₀	L ₅₀	L ₉₀	
01 Care Plus Rever	31,9	44,3	32,9	33,3	30,4	32,8	32,0	31,2	
02 Dräger Medical	23,7	38,6	24,3	24,8	22,8	24,1	23,7	23,3	
03 Giraffe	32,6	40,1	33,3	33,6	32,1	33,0	32,6	32,1	
05 Prototipo V2	18,4	43,32	18,66	20,88	17,66	19,11	18,21	17,89	
Modelo de Incubadora	Interior (2270) [dBA]								
	L _{Aeq,Ti}	L _{Ceq,Ti}	L _{Aeq,Ti}	L _{AFmax}	L _{AFmin}	L ₁₀	L ₅₀	L ₉₀	
01 Care Plus Rever	55,2	69,7	56,2	56,9	53,7	55,9	55,5	55,1	
02 Dräger Medical	48,8	54,8	49,8	50,3	47,5	49,3	48,8	48,3	
03 Giraffe	56,3	63,2	56,9	57,2	55,2	56,7	56,3	55,9	
05 Prototipo V2	22,82	51,25	26,3	35,22	16,8	25,78	20,68	17,37	

Si observamos los resultados obtenidos, podemos comprobar que en modelo Giraffe es donde se han obtenido los valores de presión sonora (Nivel continuo equivalente ponderado A $L_{Aeq,Ti}$) más elevados medidos en el interior del recinto del neonato con 56,3 dBA. Siendo esta incubadora la que también aporta mayor nivel de ruido al exterior 32,6 dBA. En estas condiciones el modelo Dräger es el que ha presentado los niveles más bajos, por debajo de los 50 dBA en el interior del recinto y con una emisión al exterior de 23,7 dBA.

Mientras algunos autores registraron niveles de presión sonora inferiores a 60 dBA, los cuales se encuentran dentro del límite de tolerancia especificado en la norma IEC 60601-2-19 [22], hay que indicar estas medidas se llevaron a cabo durante la condición de apagado. Durante el funcionamiento de la incubadora a una temperatura controlada de 36°C con un ajuste de humedad máxima, otros autores registraron niveles superiores a 60 dBA.

Los resultados obtenidos en el prototipo, son mucho más bajos tanto los medidos en el exterior como en el interior de la incubadora. En la siguiente figura 4 y 5, se muestra una comparativa entre el prototipo y los tres modelos de incubadoras estudiados.

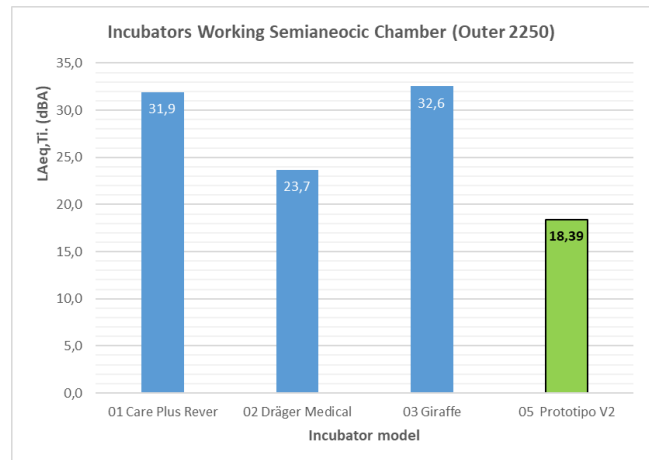


Figura 4: Incubadoras funcionando, (Exterior)

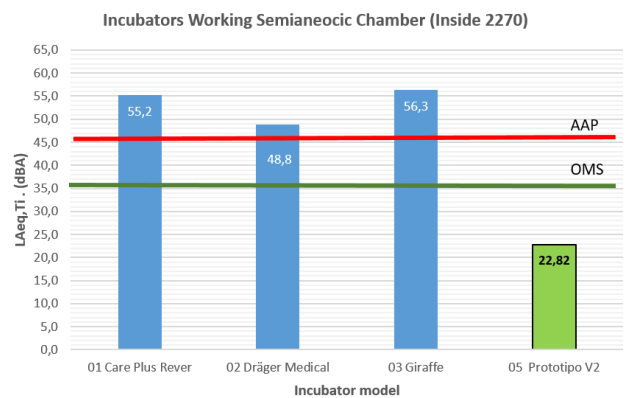


Figura 5: Incubadoras funcionando, (Interior)

En este sentido, algunos autores indican que los niveles de sonido, especialmente a bajas frecuencias, dentro de una incubadora moderna pueden alcanzar niveles que probablemente sean dañinos para el recién nacido en desarrollo. Sabemos que los dispositivos eléctricos generales y los sistemas de ventilación generan ruido de baja frecuencia <100 Hz. Estudios previos muestran que la exposición a bajas frecuencias causa alteraciones del equilibrio en humanos y ratones durante la edad adulta [28]. De hecho los efectos fisiológicos y psicológicos no auditivos pueden ser causados por niveles de ruido de baja frecuencia por debajo del umbral auditivo individual [29].

En la figura 6, se puede observar la evolución en el espectro sonoro en 1/3 de octava, en el interior de las incubadoras.

Interpretando la gráfica, en estas condiciones de medición, se observa que los niveles de presión sonora en tercio de octavas tienen diferentes comportamientos según el modelo de incubadora, la incubadora Dräger Medical tiene en general un comportamiento mejor a los otros dos modelos analizados. Al igual que en el caso anterior, se observa un peor comportamiento acústico en el interior del habitáculo de

la incubadora Care Plus en valores de frecuencia comprendidos entre los 25 Hz y 160 Hz y entre los 2,5 kHz y 6,3 kHz. Sin embargo, en el rango de frecuencia comprendido entre los 315 Hz y 1,6 kHz la incubadora Giraffe aporta un mayor aporte sonoro.

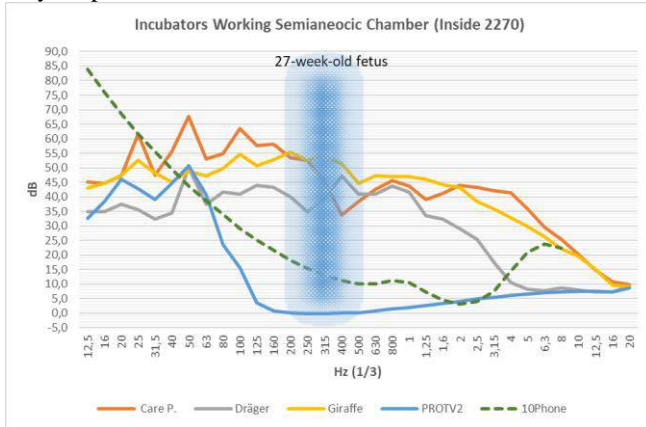


Figura 6: Incubadoras funcionando, (Interior)

Se ha representado, en línea punteada, el contorno de Igual Sonoridad de 40 dB normalizado a 10 dB a 1 kHz. El área del espectro comprendida entre los 200 Hz y 500 Hz, representa el rango de frecuencias sonoras a las que es sensible el neonato. Según Gerhardt et al [30], un feto de 27 semanas solo puede oír sonidos de baja frecuencia (por debajo de 500 Hz) y tarda dos semanas más en detectar frecuencias superiores a 500 Hz. No obstante, aunque esta opinión es sostenida por otros investigadores, existe una gran disparidad en los resultados.

Un estudio realizado por Hepper y Shahidullah [31], concuerda con Gerhardt et al., al ubicar la frecuencia de corte de la audición para fetos de 19 a 27 semanas en 500 Hz. Además, Lahav A et al.[32], coinciden en situar la sensibilidad auditiva por encima de los 1000 Hz a partir de las 33 semanas de gestación (Lahav A et al., 2015).

Sin embargo, Avery et al.[33], afirmaron que el rango de sensibilidad auditiva de un feto en el tercer término del embarazo es de 500 a 1000 Hz y el de un recién nacido a término es de 400 a 4000 Hz.

Podemos observar que los valores obtenidos en el prototipo, se encuentran por debajo la curva de igual sonoridad para 10 Phone. Incluso para el caso de un prematuro con 27 semanas de gestación. Estos datos demuestran las posibilidades que ofrece esta investigación y el prototipo

Por lo tanto, es posible que los recién nacidos tengan un riesgo potencial de exposición a las bajas frecuencias en la UCIN. Sin embargo, no se ha estudiado suficientemente los riesgos potenciales de la exposición niveles de ruido de baja frecuencia [34] de los neonatos y los posibles efectos adversos en la salud de los recién nacidos, de ahí la importancia del tratamiento frecuencial de los niveles de exposición al que están sometidos. Pensamos que

precisamente por ello, Harrison [35] centra su preocupación en la exposición a dosis de ruido de alta frecuencia (>800 Hz) durante esta etapa en la que el sistema auditivo de los prematuros aún no está completamente desarrollado.

Aun así, en los datos obtenidos se concluye que efectivamente los valores más altos se encuentran en las bajas frecuencias.

3.2. Incubadora funcionando con influencia de la alarma de Temperatura

Con el objeto de analizar la influencia de la presencia de alarmas tanto en el interior como en el exterior de la incubadora, se midieron cada uno de los tres modelos de incubadora, situados en el interior de la cámara semianecoica. En estas condiciones los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla [Tabla 3].

Tabla 3. Incubadoras funcionando con influencia de la alarma de Temperatura

Modelo de Incubadora	Exterior (2250) [dBA]							
	L _{Aeq,Ti}	L _{Ceq,Ti}	L _{Aeq,Ti}	L _{Afmax}	L _{Afmin}	L ₁₀	L ₅₀	L ₉₀
01 Care Plus +T	56,6	55,5	63,6	65,2	29,9	56,9	56,5	56,1
01 Care Plus	31,9	44,3	32,9	33,3	30,4	32,8	32,0	31,2
01 Diferencia	24,7	11,2	30,7	31,9	-0,5	24,1	24,5	24,9
02 Dräger + T	72,6	76,0	78,2	79,9	22,7	78,1	51,8	23,5
02 Dräger	23,7	38,6	24,3	24,8	22,8	24,1	23,7	23,3
02 Diferencia	48,9	37,4	53,9	55,1	-0,1	54,0	28,2	0,2
03 Giraffe + T	58,0	58,0	64,3	64,3	31,0	62,0	56,9	31,7
03 Giraffe	32,6	40,1	33,3	33,6	32,1	33,0	32,6	32,1
03 Diferencia	25,5	17,9	31,0	30,7	-1,1	29,1	24,3	-0,5
05 Prototipo V2	18,39	43,32	18,66	20,88	17,66	19,11	18,21	17,89
05 Prot + 01 Care	25,6	43,3	31,0	32,2	17,7	25,3	25,4	25,7
05 Prot + 01 Dräger	48,9	44,3	53,9	55,1	17,7	54,0	28,6	18,0
05 Prot + 01 Giraffe	26,2	43,3	31,3	31,1	17,7	29,5	25,3	18,0

Modelo de Incubadora	Interior (2270) [dBA]							
	L _{Aeq,Ti}	L _{Ceq,Ti}	L _{Aeq,Ti}	L _{Afmax}	L _{Afmin}	L ₁₀	L ₅₀	L ₉₀
01 Care Plus +T	59,1	71,8	62,4	64,1	55,7	59,9	59,5	59,1
01 Care Plus	55,2	69,7	56,2	56,9	53,7	55,9	55,5	55,1
01 Diferencia	3,9	2,1	6,2	7,2	2,0	4,0	4,0	4,0
02 Dräger + T	58,4	62,3	66,3	68,8	47,6	61,1	50,8	48,6
02 Dräger	48,8	54,8	49,8	50,3	47,5	49,3	48,8	48,3
02 Diferencia	9,6	7,5	16,6	18,5	0,1	11,8	2,0	0,3
03 Giraffe + T	56,6	63,2	57,5	58,0	54,9	57,2	56,7	55,8
03 Giraffe	56,3	63,2	56,9	57,2	55,2	56,7	56,3	55,9
03 Diferencia	0,3	0,0	0,6	0,8	-0,3	0,5	0,3	-0,1
05 Prototipo V2	22,82	51,25	26,3	35,22	16,8	25,78	20,68	17,37
05 Prot + 01 Care	22,9	51,3	26,3	35,2	16,9	25,8	20,8	17,6
05 Prot + 01 Dräger	23,0	51,3	26,7	35,3	16,9	25,9	20,7	17,5
05 Prot + 01 Giraffe	22,8	51,3	26,3	35,2	16,9	25,8	20,7	17,4

Si observamos los resultados obtenidos, podemos comprobar que el modelo Care Plus es donde se han obtenido los valores de presión sonora (Nivel continuo equivalente ponderado A LAeq,Ti) más elevados medidos en el interior del recinto del neonato con 59,1 dBA. Sin embargo, la que aporta mayor nivel de ruido al exterior es el modelo Dräger con 72,6 dBA, ello se debe a la disposición de esta alarma en esa incubadora.

En esta situación el modelo de incubadora que aporta un menor nivel de presión sonora al interior del recinto del neonato es la Giraffe (Figura 7). Este hecho puede ser debido a la disposición de la alarma y sus características acústicas, las cuales son diferentes en cada una de ellas. No obstante, los valores obtenidos siguen siendo muy elevados y se encuentran por encima de las recomendaciones internacionales.

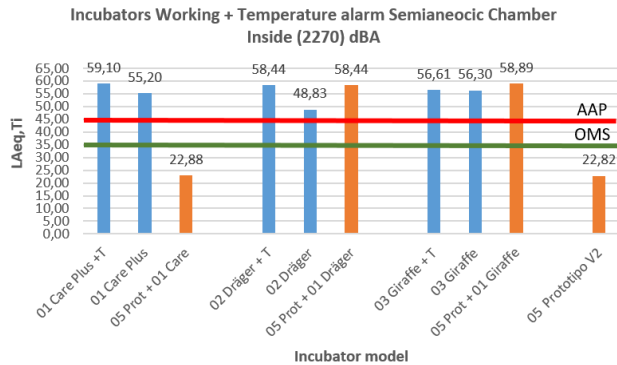


Figura 7: Incubadoras funcionando con influencia de la alarma de Temperatura, (Interior)

En el caso del prototipo, los valores son estimados. A los valores del prototipo funcionando, se les ha sumado (para cada banda de tercio de octava) el valor correspondiente de la aportación de la alarma de temperatura de cada modelo de incubadora. En esta situación estimada, los valores obtenidos se encuentran por debajo de las demás incubadoras, demostrando que incluso en esta condición es posible mantener un nivel por debajo de las recomendaciones internacionales.

En estas condiciones en las que la incubadora está en funcionamiento y la alarma por temperatura sonando, la incubadora Dräger Medical aporta una mayor amplitud sonora al exterior frente a los otros dos modelos de incubadoras analizados, tanto en medias como en altas frecuencias. Es en este caso, en el cual la incubadora Care Plus produce un menor aporte sonoro.

En la figura 8, se puede observar la evolución en el espectro sonoro en 1/3 de octava, en el interior de las incubadoras

Se observa que, en las tres situaciones estimadas para el prototipo, los valores en 1/3 de octava, son inferiores respecto a los medidos en los diferentes modelos de incubadoras, especialmente en el área de mayor sensibilidad del neonato.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el prototipo NICA+, son muy prometedores y ponen de manifiesto la bondad de la propuesta de diseño y mejora del confort acústico de las incubadoras neonatales.

Los valores obtenidos demuestran que, los recién nacidos prematuros, en condiciones normales de uso de la

incubadora NICA+, pueden estar expuestos a niveles de ruido por debajo de las recomendaciones internacionales.

A raíz de los resultados obtenidos en este trabajo y los que le han precedido, es necesario implementar soluciones de acondicionamiento acústico en el diseño de una unidad de cuidados intensivo neonatal, ya que una vez controlada las incubadoras, el problema se traslada a su entorno sonoro.

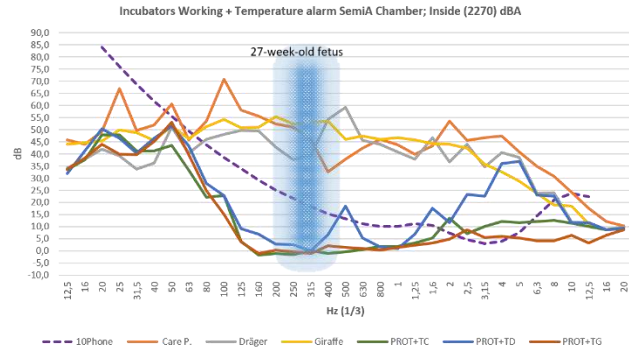


Figura 8: Incubadoras funcionando con influencia de la alarma de Temperatura, (Interior)

RECONOCIMIENTOS

Diseño y mejora del confort acústico de las incubadoras neonatales: Programas de apoyo a la creación y desarrollo de prototipos: Secretaría General de Universidades, Investigación y Tecnología, actividades de transferencias de conocimiento, Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020). Ref: ID: 6018 N° Exp.: 1157205: Neonatal Incubators Comfort Acoustic Class (NICA+).

REFERENCIAS

- [1].- March 7, 1933. J. H. Hess Infant incubator Filed Aug. 5, 1929 Patented Mar. 7, 1933 PATENT OFFICE JULIUS H. HESS, OF CHICAGO, ILLINOIS INFANT INCUBATOR Application filed August 3, 1929. Serial No. 383,403.
- [2]. - Aug. 15, 1967 J R, Grosholz et al 3,335,713. Infant incubator mlm Nov. 3, 1963 8 Sheets-Sheet 1 11111 Ilvmbw J. R. Grosholz et al 3,335,713
- [3].- Xavier Pardel, Apuntes de electromedicina: "Incubadora neonatal. CENETEC; 21/09/2023. Disponible en: www.medicaexpo.es.
- [4].- Sen M. Kuo Lichuan Liu; Apparatus, system and method for noise cancellation and communication for incubators and related devices; Northern Illinois Research Foundation. 2013. US13/837,242. US20130204617A1
- [5].- Uri Rapoport; Incubator with a noise muffling mechanism and method thereof. Application PCT/IL2014/050785 events; 2014.
- [6].- R. Hernandez Molina *et al.*, "Análisis del ambiente sonoro en una Unidad de Cuidados Intensivos de Neonatología," XI Congr. Iberoam. Acústica; X Congr. Ibérico Acústica; 49º Congr. Español Acústica - TECNIACUSTICA'18-, 2018

- [7].- Almadhoob A., Ohlsson A. (2015). Sound reduction management in the neonatal intensive care unit for preterm or very low birth weight infants. *Cochrane Database Syst. Rev.* 1:CD010333 DOI: 10.1002/14651858.CD010333.pub2
- [8].- Rodríguez-Montaña, V.M. et al; Acoustic Conditioning of the Neonatal Incubator Compartment: Improvement Proposal. *Front. Pediatr.* **2022**, *10*, 955553. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.955553>.
- [9].- Stennert, E; Schulte, Fj; Vollrath, M. Incubator Noise and Hearing-Loss. *EARLY HUMAN DEVELOPMENT*. Vol.1, Num.1, Pag.113-115. 1977.
- [10].- Barreto, E et al. Do former preterm infants remember and respond to NICU. *EARLY HUMAN DEVELOPMENT*. Vol.82, Num.11, Pag.703-707. 2006.
- [11].- De Oliveira Rodarte, M.D.; Fujinaga, C.I.; Leite, A.M.; Salla, C.M.; Silva, C.G. da; Scochi, C.G.S. Exposure and Reactivity of the Preterm Infant to Noise in the Incubator. *CoDAS* **2019**, *31*, e20170233. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20192017233>.
- [12].- T. Morata and U. Santos, “Efeitos do ruído na audição. In: Santos, UDP. Ruído: Riscos e Prevenção. São Paulo, Hucitec,” pp. 43–54, 1996
- [13].- L. da Silva Reis Santana *et al.*, “Measurement of acoustic noise levels in a Neonatal Intensive Care Unit,” *REME Rev. Min. Enferm.*, vol. 19, no. 2, pp. 27–31, 2015.
- [14].- Wroblewska-Seniuk, K.; Greczka, G.; Dabrowski, P.; Szyfter-Harris, J.; Mazela, J. Hearing Impairment in Premature Newborns—Analysis Based on the National Hearing Screening Database in Poland. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0184359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184359>.
- [15].- Fortes-Garrido, J.C.; Velez-Pereira, A.M.; Gázquez, M.; Hidalgo-Hidalgo, M.; Bolívar, J.P. The Characterization of Noise Levels in a Neonatal Intensive Care Unit and the Implications for Noise Management. *J. Environ. Health Sci. Eng.* **2014**, *12*, 104. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-104>.
- [16].- Darcy AE, Hancock LE, Ware EJ. A descriptive study of noise in the neonatal intensive care unit. Ambient levels and perceptions of contributing factors. *Advances in Neonatal Care*. 2008; 8(5): S16–S26.
- [17].- Fortes-Garrido, JC et al. The characterization of noise levels in a neonatal intensive care unit and the implications for noise management. *JEHSE*. Vol.12, Num.104. 2014
- [18].- A. J. Knutson, “Acceptable noise levels for neonates in the neonatal intensive care unit,” *Indep. Stud. Capstones*, p. Program in Audiology and Communication Sciences, W, 2012.
- [19].- American Academy of Pediatrics. Committee on Environmental Health, “Noise: A Hazard for the Fetus and Newborn,” *Pediatrics*, vol. 100, no. 4, pp. 724–727, 1997.
- [20].- A. D. M. Jackson, “Guidelines for Perinatal Care,” *Am. Acad. Pediatr.*, 1986
- [21].- *EN IEC 60601-2-2:2018*; Medical Electrical Equipment—Part 2-2: Particular Requirements for the Basic Safety and Essential Performance of High Frequency Surgical Equipment and High Frequency Surgical Accessories. IEC: London, UK, 2018. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/bd56ff83-1df5-41e8-89aa-f89f5abdf25d/en-iec-60601-2-2-2018> (accessed on 20 September 2022).
- [22].- ANSI/AAMI/IEC 60601-2-19:2009. Medical Electrical Equipment — Part 2-19: Particular requirements for the basic safety and essential performance of infant incubators
- [13].- K. Persson Waye, “A caring sound environment in hospitals?,” *Care Sound*, pp. 11–26, 2013
- [24].- NTP 270: Evaluación de la exposición al ruido. Determinación de niveles representativos; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. 1991
- [25].- Ricardo Hernandez et al; Incubadora con sistema para la mejora del confort acústico del neonato. OEPM P202330766, Madrid. 12 septiembre 2023
- [26].- Ricardo Hernández-Molina et al; Diagnóstico del ruido en el interior de incubadoras neonatales en condiciones de campo libre. 53º Congreso Español de Acústica - Tecniacústica 2022; ID-13 SEA. <https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Elche22/ID-13.pdf>
- [27].- Ricardo Hernández-Molina et al; Diagnóstico de ruido inside neonatal incubators in free field conditions. *Acoustics* **2023**, *5*(2), 354-366, eISSN: 2624-599X; <https://doi.org/10.3390/acoustics5020021>
- [28].- Nobutaka Ohgami, Reina Oshino, and Masashi Kato; “Risk Assessment of Neonatal Exposure to Low Frequency Noise Based on Balance in Mice”; *Frontiers in behavioral neuroscience*, vol. 11 30. 22 Feb. 2017, doi:10.3389/fnbeh.2017.00030
- [29].- Leventhall, G., Pelmear, P. and Benton, S. 2003. A review of published research on low frequency noise and its effects. UK Department for Environment, Food and Rural Affairs. <https://doi.org/EPG1/2/50>
- [30].- Gerhardt KJ, Abrams RM. Fetal exposures to sound and vibroacoustics stimulation. *Journal of Perinatology*. 2000; 20:S20–S29
- [31].- S. B. Hepper PG, “Development of fetal hearing,” *Arch Dis Child*, pp. 81–87, 1994.
- [32].- A. Lahav, “Questionable sound exposure outside of the womb: frequency analysis of environmental noise in the neonatal intensive care unit,” *Acta Paediatr.*, vol. 104, no. 1, pp. e14–e19, 2015.
- [33].- G. B. Avery, M. A. Fletcher, and M. G. MacDonald, *Neonatología: fisiopatología y manejo del recién nacido*. Médica Panamericana, 2001.
- [34].- Schust M. Effects of low frequency noise up to 100 Hz. *Noise Health* 2004;6:73-85
- [35].- Harrison, L.L.; Roane, C.; Weaver, M. The relationship between physiological and behavioral measures of stress in preterm infants. *Journal of obstetric, gynecologic, and neonatal nursing (JOGNN)*. Vol.33 Num.2 Pag.236-245. 2004

EL IMPACTO DEL RUIDO EN EL SISTEMA AUDITIVO. SINAPTOPATÍA COCLEAR EN EL PACIENTE CON TINNITUS.

Sheila Templado Aguilera^{1,2}*
Luis Miguel Amorós Rodríguez^{2}*
María Teresa Almela Rojo^{2,4}*
Guillermo Savio^{3}*
Francisco José García-Purriños^{1,4}*

¹Universidad Católica de Murcia, (UCAM), Murcia, España.

²Clínica Templado – Audiología Avanzada, Murcia, España.

³Dto. De Investigación de Intelligent Hearing Systems, Miami; FL. USA.

⁴Hospital Universitario Los Arcos del Mar Menor, España.

RESUMEN

La exposición a ruido tiene consecuencias en el funcionamiento de nuestro sistema auditivo. Síntomas como los acúfenos, sensibilidad a sonidos fuertes, o problemas de inteligibilidad en entornos ruidosos, pueden hacernos sospechar estas lesiones, muchas veces ocultas en las pruebas audiológicas convencionales, como ocurre con la sinaptopatía coclear.

Su detección precoz, diagnóstico, y tratamiento, son fundamentales para resolver la sintomatología y los efectos que el impacto de la privación auditiva incluso leve y en estadios tempranos de evolución, puede producir a nivel del córtex cerebral, con una reorganización crossmodal entre diferentes áreas funcionales.

ABSTRACT

Exposure to noise has consequences on our auditory system. We are able to suspect a damage in patients with symptoms as tinnitus, loud sounds sensitivity or intelligibility problems in noise conditions which are often hidden in conventional audiological tests, for example in case of cochlear synaptopathy.

Their early detection, diagnosis and treatment are essential to resolve the symptoms and the effects that the impact of even mild auditory deprivation in early stages of evolution can produce at the level of the cerebral cortex, with crossmodal reorganization between different functional areas.

Palabras Clave— Acúfenos, tinnitus, sinaptopatía coclear, ruido, hipoacusia.

Key words— Tinnitus, cochlear synaptopathy, noise, hipoacusia.

1. INTRODUCCIÓN

Según los últimos datos publicados por la OMS, se considera audición normal, aquella establecida mediante promedio tonal aéreo de entre 0 y 20 decibelios (dB); y pérdida auditiva discapacitante a toda aquella que supere al menos un promedio de 35 dB en el oído que oye mejor. Los datos epidemiológicos que ofrece esta organización determinan que, más del 5% de la población mundial (430 millones de personas), actualmente padece pérdida auditiva discapacitante que requiere rehabilitación. Esta organización considera además, que para 2050, se prevé que haya casi 2500 millones de personas con algún grado de pérdida auditiva, y al menos 700 millones de personas necesitarán rehabilitación.

Debido a prácticas poco seguras, más de 100 millones de jóvenes adultos corren el riesgo de sufrir pérdida auditiva de forma permanente, susceptible de ser evitada si se cambiasen estos ambientes, siendo la exposición a ruido una de las causas más habituales de hipoacusia adquirida. Entre las consecuencias, se establecen como problemas los de la comunicación y el habla, la cognición, y el estigma. [1].

Es el estigma ligado a los problemas de audición, uno de los motivos por los que, según hemos detectado en nuestra práctica clínica, muchas personas se embarcan en un proceso

* **Autor de contacto:** mtemplado@alu.ucam.edu.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

psicológico de negación y rechazo al diagnóstico y/o al tratamiento, que puede retrasar tanto la detección y diagnóstico precoces, como a la intervención y tratamiento.

2. TINNITUS COMO SÍNTOMA

El tinnitus se define como la percepción de un ruido o pitido, producido por actividad eléctrica aberrante, generado a nivel de la vía auditiva, y en ausencia de estímulos acústicos exteriores que lo provoquen.

Se clasifican en dos tipos; objetivos o somatosonidos, que representan tan solo el 5%, que puede ser percibido por el examinador, y tienen como causa, fenómenos hidrodinámicos en patologías de tipo vascular (arteriosclerosis, glomus yugular, bucle arterial anormal en el canal auditivo interno, hipertensión arterial, shunt arteriovenoso); y subjetivos, que no son percibidos por el examinador y es percibido como propio en ausencia de un estímulo exterior que lo provoque.

Es necesario descartar, durante la evaluación, las alucinaciones auditivas o los provocados por la memoria eidética, ya que su evaluación y enfoque terapéutico deben ser abordados por especialistas en salud mental.

Según la *American Tinnitus Association*, el tinnitus o acúfeno, es el tercer síntoma más incapacitante que puede padecer una persona, solo por detrás del dolor intenso o los problemas de equilibrio. Su gravedad se intensifica por la falta de diagnóstico o la determinación por parte del médico de que los acúfenos no tienen cura, estableciendo en el paciente la idea errónea de que éstos no tienen tratamiento o solución.

Si bien la prevalencia real es difícil de precisar, se cree que entre el 10 y el 17% de la población mundial está afectada por este síntoma. Se cree también que, en los jóvenes, por hábitos como la música con auriculares y la exposición a ruido, el porcentaje de afectados es del 19%. [2].

3. SINAPTOPATÍA COCLEAR

Liberman definió la sinaptopatía coclear (SC) o hipoacusia oculta (hidden hearing loss) como una pérdida de sinapsis entre las células ciliadas internas y las fibras nerviosas auditivas ante la exposición a ruido.

Estos pacientes pueden mostrar un aumento de umbrales tonales auditivos entre 10.000 y 16.000 hercios (Hz), pero manteniendo un promedio tonal aéreo (PTA) dentro de la normalidad. Pueden mostrar un aumento de los umbrales del reflejo estapedial, unas otoemisiones acústicas dentro de la normalidad, y con latencia y amplitud de la onda I del potencial evocado auditivo de tronco cerebral también dentro de la normalidad. [3].

4. REORGANIZACIÓN CORTICAL EN HIPOACUSIAS LEVES

Cuando se produce una alteración en el funcionamiento del sistema auditivo, más allá de la pérdida cuantitativa de audición, se generan alteraciones que impactan directamente en la organización normal del córtex cerebral.

Los trabajos de Julia Campbell y Anu Sharma, [4,5], han demostrado, mediante estudios de neuroimagen por resonancia magnética funcional (fMRI), y potenciales evocados auditivos corticales (CAEP, siglas en inglés), que la privación auditiva incluso leve, produce una reorganización cortical cross-modal y cambios compensatorios en pacientes hipoacúsicos incluso en estadios tempranos de evolución.

5. ELECTROCOCLEOGRAFÍA (ECHOCHG), UNA TÉCNICA PARA LA DETECCIÓN PRECOZ Y DIAGNÓSTICO DIFERENCIAL EN LA SINAPTOPATÍA COCLEAR O HIPOACUSIA OCULTA.

La electrococleografía (EcochG) es un test electrofisiológico, objetivo, que se utiliza para registrar los potenciales bioeléctricos de la cóclea y de la porción distal del VIII par craneal en respuesta a un estímulo acústico.

Con una sensibilidad del 92% y una especificidad del 84%, [6], consiste en la captación de los potenciales de polarización y despolarización de las células ciliadas cocleares y el potencial eléctrico inicial del nervio coclear.

Está indicada para ayudar en el diagnóstico diferencial de lesiones cocleares y retrococleares, hipoacusias súbitas, rotura de la ventana redonda, Enfermedad de Menière o Hidropsia endolinfática, neuropatía auditiva y de forma emergente, en la SC. [7].

Si bien la electrococleografía ha sido tradicionalmente utilizada para el diagnóstico diferencial de la enfermedad de Menière, entre sus distintas utilidades clínicas, se encuentra el estudio de la función coclear y su sinapsis con las primeras neuronas del nervio auditivo, este hecho la convierte en una técnica idónea para el diagnóstico diferencial en pacientes con tinnitus.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es mostrar la utilidad de la EcochG, que combinada con otras pruebas de diagnóstico audiológico, nos ayuda en la determinación de la fisiopatología y la génesis del tinnitus en pacientes afectados por este síntoma, todos ellos, con antecedentes de exposición a ruido, y previamente filiados como normooyentes.

5. METODOLOGÍA

5.1. evaluación audiológica general del paciente de tinnitus.

La evaluación audiológica necesaria para la determinación de la fisiopatología y la génesis del tinnitus, debe incluir: exploración visual del oído externo y medio, otoimpedanciometría con reflejos ipsilaterales y contralaterales, audiometría tonal de ultra-alta frecuencia, hasta 16.000-20.000 Hz; emisiones otoacústicas por productos de distorsión, transitorias, de supresión, y espontáneas; electrococleografía, y potenciales evocados auditivos de tronco cerebral.

No se incluyen en esta descripción ni las pruebas de imagen, como la resonancia nuclear magnética (RNM) por no ser pruebas audiológicas, ni las pruebas funcionales mediante test de inteligibilidad; no por ello son menos importantes, pues las pruebas de imagen son imprescindibles para el diagnóstico otológico diferencial y descartar determinadas lesiones orgánicas, y las pruebas de inteligibilidad serán necesarias en función del grado incapacitante a nivel comunicativo, y de habla en ruido que manifieste el paciente; así como el enfoque terapéutico que se determine a posteriori. [8].

5.2. Muestra

Se estudiaron un total de 36 oídos, hombres y mujeres de entre 23.3 y 58.4 años de edad. (Tabla 1). Todos ellos con el síntoma común de tinnitus, y un diagnóstico previo de normalidad auditiva.

Todos los pacientes fueron evaluados según el procedimiento descrito en el punto 5.1. Para el objetivo de este trabajo, se han analizado los datos audiométricos y los registros electrofisiológicos de EcochG.

Se han distribuido en tres subgrupos en función del perfil audiométrico. Grupo A: audiometría normal (figura 1), Grupo B: caída en ultra-altas frecuencias (figura 2), y con escotoma y caída de altas y ultra-altas frecuencias simultáneamente (figura 3).

5.2. Procedimiento de EcochG.

Montaje de electrodos: Se utilizó un montaje de electrodos horizontal, con referencia o negativo con posicionamiento en membrana timpánica mediante electrodo tipo wick, positivo en mastoides contralateral (M2) y GND en N1. Los registros biofisiológicos fueron obtenidos mediante hardware DUET y software Smart EP® de Intelligent Hearing Systems. La impedancia de wick fue en todos los casos inferior a 5 Ohms y del resto de electrodos por debajo de 2.5 Ohms.

El paciente relajado en cabina insonorizada, sin actividad miogénica, en decúbito supino, y la cabeza lateralizada hacia el lado contrario de la exploración.

El análisis de estadística descriptiva ha sido realizado mediante el software JAMOVI®

8. RESULTADOS

Siguiendo los criterios de Liberman, fueron filiados como Sinaptopatía Coclear Definida (SCD) aquellos casos donde el área y el ratio fueron superiores a los valores de normalidad, y aquellos en los que el área fue superior y el ratio no. Estos casos fueron un total de 19 de los 36 oídos explorados, representando un total del 55,77%.

Se determinó como probable o sospecha de SC en estudio, aquellos cuyos valores se encontraron en el límite de la normalidad o ligeramente superior, representando un total del 25% de los oídos evaluados.

Se descartó SC en aquellos casos cuyos valores de área y ratio se encontraron por debajo de los valores límite de normalidad. Representando un 22,2% de los oídos evaluados.

En total, un 77,8% fueron diagnosticados de SCD o sospecha de SC, permaneciendo estos últimos en monitorización continuada semestral de su función coclear para controlar la evolución.

La media del área y el ratio fueron superiores a los límites de normalidad establecidos por Ferraro et. Al. (1.80 para el área, y 0.35 para el ratio); pero los valores medios de latencia y amplitud del potencial de sumación y del potencial de acción se encontraron dentro de la normalidad, en todos los subgrupos. (Tabla 2).

Tabla 1. Media, mínimo y máximo, y desviación estándar de la edad de la muestra, distribuidos por grupos.

GRUPO	N	Media	Mínimo	Máximo	SD
A	5	26.1	23.3	28.7	2.6
B	13	45.7	33.2	52.8	6.4
C	18	48.1	37.1	58.4	7.07

Tabla 2. Media, mínimo y máximo, y desviación estándar de los resultados obtenidos en las electrococleografías.

EcochG	Grupo	N	Media	Mínimo	Máximo	SD
ÁREA	A	5	2.06	1.01	3.44	0.96
	B	13	2.23	1.24	4.24	0.82
	C	18	1.93	1.26	2.85	0.41
RATIO	A	5	0.39	0.06	0.71	0.25
	B	13	0.70	0.11	2.69	0.67
	C	18	0.41	0.13	0.71	0.17
SP (ms)	A	5	0.87	0.67	1.10	0.16
	B	13	1.06	0.16	0.50	0.20
	C	18	0.98	0.80	1.25	0.11
SP(uV)	A	5	0.29	0.16	0.50	0.13
	B	13	0.25	0.06	0.67	0.18
	C	18	0.38	0.002	1.07	0.34
AP (ms)	A	5	1.73	1.50	2.07	0.22
	B	13	1.64	1.52	2.12	0.15
	C	18	1.69	1.45	2.02	0.19
AP (uV)	A	5	0.87	0.56	1.08	0.21
	B	13	0.58	0.18	1.22	0.31
	C	18	0.74	0.20	1.96	0.50

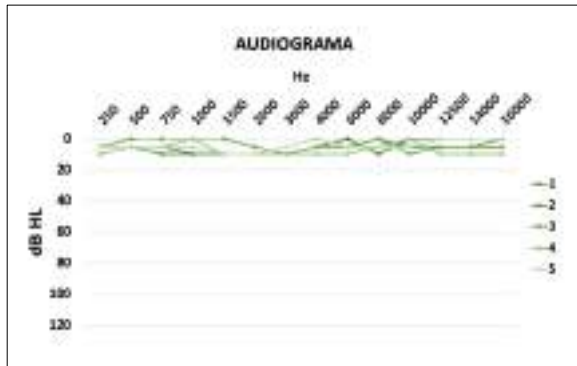


Figura 1. Cinco de los treinta y seis oídos evaluados presentaron audiograma normal. Grupo A.

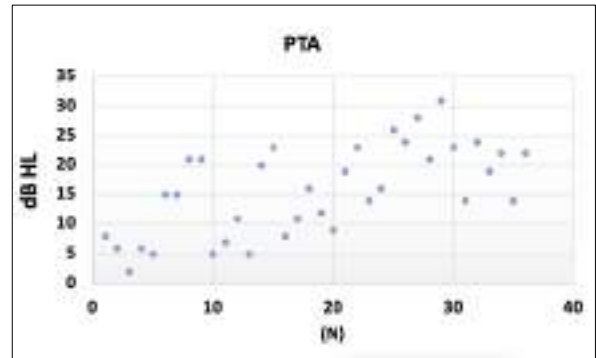


Figura 4. Promedio tonal aéreo de todos los oídos evaluados.

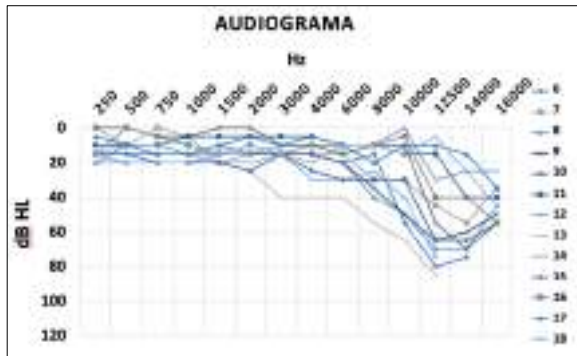


Figura 2. Trece de los treinta y seis oídos evaluados presentaron caída en ultra-altas frecuencias. Grupo B.

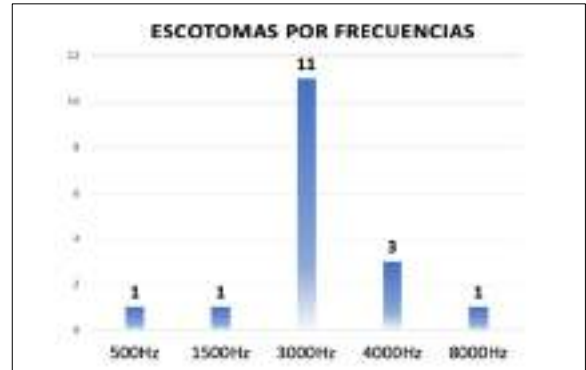


Figura 5. Distribución de escotomas por frecuencias.

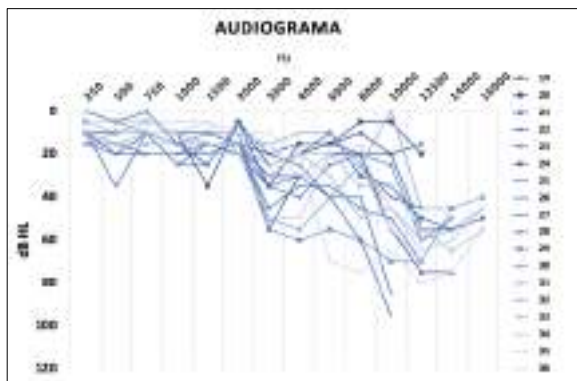


Figura 3. Dieciocho de los treinta y siete oídos evaluados, presentaron escotoma y caída en altas y ultra-altas frecuencias de forma simultánea. Grupo C.

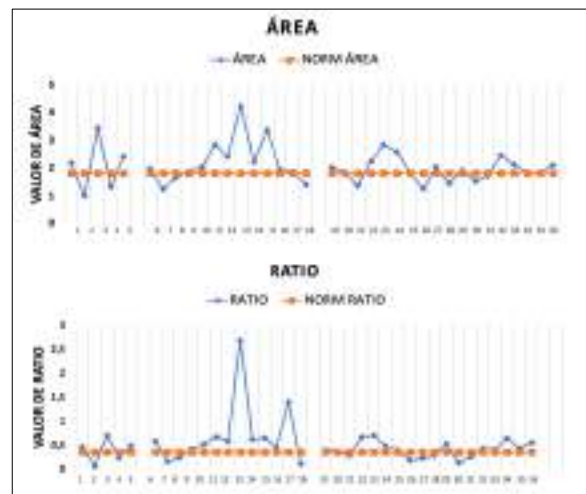


Figura 6. Resultados de electrocochleografía, divididos en dos gráficos, área y ratio, con valores normativos (Ferraro, 2009).

9. DISCUSIÓN

Tal como muestran estudios en modelos animales, la exposición al ruido impacta en las conexiones sinápticas entre las células ciliadas internas y las neuronas del nervio auditivo; pudiendo degenerar antes que las células ciliadas externas; y que puede producirse incluso, permaneciendo los audiogramas normales. Por lo tanto, la audiometría de alta y ultra-alta frecuencia, el estudio de los reflejos estapediales, las emisiones otoacústicas y la electrocoleografía, son las pruebas fisiológicas más importantes para el estudio de los pacientes con exposición a ruido, que pueden manifestar tinnitus o hiperacusia como síntomas [9]; siendo la EcochG, la prueba que nos permite un estudio de la sinapsis; como manifiestan los trabajos de investigación de Liberman et. Al. [10,11,12,13]

10. CONCLUSIONES

El uso del promedio tonal aéreo no es suficiente para determinar el grado de lesión auditiva discapacitante, pues no reflejan alteraciones fisiológicas funcionales, que dan como resultado síntomas como el tinnitus; que en muchas personas condiciona gravemente su calidad de vida, y puede desencadenar enfermedades de tipo neuropsicológico y psiquiátrico, como la ansiedad, la depresión, alteraciones del sueño, trastornos obsesivos, incluso la autolisis.

Estos trastornos de tipo psiquiátrico y psicológico, se ven incrementados incluso motivados, por la falta de diagnóstico y de opciones terapéuticas. El médico especialista en otorrinolaringología, responsable del diagnóstico patológico y el tratamiento de las alteraciones del sistema auditivo, junto con especialistas de campos afines como son los audiólogos, psicólogos, y psiquiatras; deben abordar estos casos desde la búsqueda de la objetividad diagnóstica, y la evaluación y tratamiento interdisciplinarios.

Además, tal como han demostrado los estudios de investigación de Anu Sharma descritos en el punto 4, la pérdida auditiva incluso leve, y en estadios tempranos de evolución, generan efectos de reorganización a nivel del córtex cerebral. Este tipo de evaluaciones y la importante utilidad de la electrocoleografía, nos permiten una detección precoz de lesiones que, tal como se muestra en nuestro estudio, se incrementan con la edad y con una exposición mayor en el tiempo al ruido. Detectarlo de forma precoz permite asesorar y sensibilizar a los pacientes en medidas preventivas para evitar esta sobreexposición y su evolución.

11. REFERENCIAS

[1] <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>

[2] Curet, C., & Roitman, D. (2016). Tinnitus–Evaluación y manejo. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 27(6), 848-862.

[3] Liberman, M. C., Epstein, M. J., Cleveland, S. S., Wang, H., & Maison, S. F. (2016). Toward a differential diagnosis of hidden hearing loss in humans. *PLoS one*, 11(9), e0162726.

[4] Campbell, J., & Sharma, A. (2014). *Cross-modal reorganization in adults with early stage hearing loss*. *PLoS One*, 9(2), e90594.

[5] Julia Campbell, & Anu Sharma. (2013). *Compensatory changes in cortical resource allocation in adults with hearing loss*. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 7.

[6] Murad O. Al-momani, John A. Ferraro, Byron J. Gajewski & Gregory Ator (2009) Improved sensitivity of electrocochleography in the diagnosis of Meniere's disease, *International Journal of Audiology*, 48:11, 811-819, DOI: 10.3109/14992020903019338

[7] Kara, E., Aydın, K., Akbulut, A. A., Karakol, S. N., Durmaz, S., Yener, H. M., ... & Kara, H. (2020). Assessment of hidden hearing loss in normal hearing individuals with and without tinnitus. *The Journal of International Advanced Otolaryngology*, 16(1), 87.

[8] Barbee, C. M., James, J. A., Park, J. H., Smith, E. M., Johnson, C. E., Clifton, S., & Danhauer, J. L. (2018, May). Effectiveness of auditory measures for detecting hidden hearing loss and/or cochlear synaptopathy: a systematic review. In *Seminars in hearing* (Vol. 39, No. 02, pp. 172-209). Thieme Medical Publishers.

[9] Schaette, R., & McAlpine, D. (2011). Tinnitus with a normal audiogram: physiological evidence for hidden hearing loss and computational model. *Journal of Neuroscience*, 31(38), 13452-13457.

[10] Liberman MC, Kiang NY. *Acoustic trauma in cats. Cochlear pathology and auditory-nerve activity*. *Acta oto-laryngologica*. 1978; 358:1-63. PMID: 281107.

[11] Fried MP, Dudek SE, Bohne BA. Basal turn cochlear lesions following exposure to low-frequency noise. *Transactions Section on Otolaryngology American Academy of Ophthalmology and Otolaryngology*. 1976; 82(3 Pt 1):285-98. PMID: 960396.

[12] Wang Y, Hirose K, Liberman MC. Dynamics of noise-induced cellular injury and repair in the mouse cochlea. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2002; 3(3):248-68. PMID: 12382101.

[13] Valero MD, Hancock KE, Liberman MC. *The middle ear muscle reflex in the diagnosis of cochlear neuropathy*. *Hear Res*. 2016; 332:29-38. doi: 10.1016/j.heares.2015.11.005 PMID: 26657094.

AYUDA EN ENTORNOS RUIDOSOS PARA PERSONAS CON PÉRDIDA AUDITIVA

Orlando Daniel Costa Faria^{1*}

¹ Sonova Ibérica, San Vicente del Raspeig, España

RESUMEN

Las personas con pérdida auditiva tienen particular dificultad para desenvolverse en entornos ruidosos, especialmente cuando necesitan comunicarse con una o varias personas. Las soluciones auditivas modernas ofrecen estrategias de tratamiento del sonido que mejoran la SNR para mejorar la inteligibilidad en entornos complejos. Además, el uso de micrófonos remotos permite apoyar a los usuarios de soluciones auditivas en situaciones específicas para cubrir necesidades determinadas. El sector del cuidado auditivo lleva décadas afrontando el problema de la inteligibilidad en ruido. ¿En qué punto nos encontramos?

ABSTRACT

People who have hearing loss cannot work out in noisy environments, especially when they need to communicate with one or more people. Modern hearing solutions give us sound treatment strategies which improve the SNR, so they improve the voice intelligibly in high environments. Moreover, the use of remote microphones helps the hearing solutions users to improve specific needs. The health care hearing sector has having the issue of the intelligibility in noise situations from decades. In which point are we?

Palabras Clave— Hipoacusia, SNR, comprensión verbal, estrategias de tratamiento de sonido, accesorios.

Key Words— Hearing Loss, SNR, speech understanding, sound processing strategies, accessories.

1. INTRODUCCIÓN

Las personas con pérdida auditiva (hipoacusia) tienen dificultades para oír sonidos y para la comprensión verbal. El

gran reto para la comprensión verbal de las personas con hipoacusia es el ruido, incluso siendo usuarias de dispositivos auditivos con la última tecnología. Es más, la hipoacusia no solo afecta la comprensión verbal, sino que también puede reducir la sensación de conexión social y el bienestar [1].

De hecho, el impacto socioemocional de la pérdida auditiva se confirmó a través de una revisión reciente, en la que se analizaron 78 artículos y datos notificados por más de 20 000 participantes. Los resultados mostraron que las personas con hipoacusia informaron de consecuencias sociales de su pérdida auditiva, como retraimiento y aislamiento social. Los interlocutores también estaban preocupados sobre las posibilidades de que sus acompañantes, con pérdida auditiva, no participaran durante las salidas, se sintieran aislados en eventos sociales a los que asistieran en pareja y que disfrutaran menos que antes de las situaciones sociales [2].

En una reciente encuesta de investigación de mercado tanto las personas que tenían audífonos, como las que no los tenían, indicaron que los factores de comprensión verbal más importantes eran [2]:

1. Conversación entre dos personas en entornos ruidosos.
2. Conversación grupal en entornos ruidosos.
3. Palabra suave en silencio.
4. Habla sin indicadores visuales.
5. Audición del habla a distancia.

Los fabricantes de audífonos e implantes cocleares pueden ayudar en estos casos desarrollando herramientas de estrategia de tratamiento de sonido como, por ejemplo, reductores de ruido, direccionalidades, accesorios, etc. para que estas personas puedan tener la mejor comunicación posible en su día a día. Para ello, estas herramientas deben mejorar la relación señal ruido, termino conocido como *Signal to Noise Ratio* (SNR). Cuanto mayor es la SNR, mayor es la ayuda para la comprensión verbal en entornos ruidosos.

* **Autor de contacto:** odcfaria@hotmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. OÍDO E HIPOACUSIA

El oído, tal como es conocido del punto de vista anatómico, incluye tres estructuras: oído externo, oído medio y oído interno. Las tres interactúan con funciones diferentes pero complementarias en el fenómeno de la audición. Tenemos desde mecanismos de transmisión a transformación eléctrica.

2.1. Anatomía y fisiología del oído

El oído externo es constituido por el pabellón auditivo y el canal auditivo externo (CAE). El pabellón auditivo permite distinguir de donde proviene un sonido, hace que se amplifiquen determinadas frecuencias (5000 Hz y 6000 Hz) con incrementos inferiores a 10 dB y conduce el sonido hasta el CAE. El CAE transmite el sonido hacia el tímpano generando un efecto de resonancia de las frecuencias de 2000 Hz a 4000 Hz con incrementos de hasta 20 dB. Además, protege el tímpano y el oído medio gracias a su forma sinusoidal, la presencia de folículos y la secreción de cerumen. [3].

El oído medio es constituido por la trompa de Eustaquio, la caja timpánica que incluye la cadena de huesecillos y la cavidad mastoidea. El oído medio tiene las siguientes funcionalidades:

- Amplificar el sonido, el cual ronda los 28 dB, siendo la resonancia del complejo tímpano-oscicular sobre los 800 Hz.
- Compensación de un medio gaseoso a uno líquido, garantizando que las características de las ondas sonoras que llegan a la membrana timpánica sean amplificadas y transmitidas al medio líquido del oído interno.
- Proteger el oído interno en aquellos sonidos de 70 dB o superiores al umbral auditivo.
- Ofrecer una función respiratoria crucial para la maximización de la función auditiva. De este modo, para que el tímpano y los huesecillos puedan vibrar en condiciones óptimas, es necesario que la presión en el oído medio sea igual o aproximada a la presión atmosférica. [4].

El oído interno es constituido por el laberinto óseo (vestíbulo óseo, cóclea y canales semicirculares) y laberinto membranoso (ductos semicirculares, vestíbulo membranoso y ducto coclear) [4]. La cóclea es el órgano receptor de los estímulos mecánicos percibidos y ampliados por el oído medio, la distribución tonotópica del sonido a lo largo de las dos vueltas y media de la cóclea constituye un primer filtro para la entrada del sonido y su distribución a las vías auditivas [3]. La mecánica coclear se inicia por la entrada de la onda sonora desde la ventana oval y hace vibrar el líquido endolinfático [3]. La estimulación de las células ciliadas a lo largo del canal coclear no se produce de forma aleatoria, sino que corresponde a una estimulación tonotópica en función de la frecuencia del sonido. Así, los tonos más agudos estimulan la región más basal y los tonos más graves en región apical. Esto explica por qué los traumatismos acústicos tienen

especial repercusión en los tonos agudos, ya que su zona de recepción está más próxima de la fuente sonora. [3].

2.2. Hipoacusia

Cualquier problema encontrado en las 3 estructuras del oído provocará una hipoacusia y podemos dividirlos en tres tipos: hipoacusia de transmisión o conducción, hipoacusia de percepción o neurosensorial e hipoacusia mixta. Éstas pueden tener varios grados y diferentes dificultades.

La hipoacusia de transmisión se debe a una disminución en la transmisión por vía aérea del sonido, causada por una patología del oído externo y/o medio. Una de las maneras de identificarlo podría ser cuando se realiza un estudio por vía ósea y sus respuestas están dentro de los valores normales, ya que el oído interno y vía auditiva central se encuentran intactos [5].

La hipoacusia neurosensorial se debe a una alteración en la percepción del mensaje sonoro, dependiendo de que la lesión se localice en la cóclea (falla de transducción) o en la vía auditiva (falla de transmisión del impulso nervioso), se diferencian en hipoacusia de percepción de origen coclear y de origen retrococlear [5]. En la audiometría tonal la audición por vía aérea y ósea están afectadas, lo que dará curvas paralelas con una diferencia menor o igual a 10 dB [5].

La hipoacusia mixta es debida a alteraciones en la transmisión y en la percepción del sonido en el mismo oído [5]. En la audiometría tonal los umbrales de vía aérea y vía ósea superan los 20 dB, existiendo entre ellos una diferencia de 10 dB [5].

Clasificamos la hipoacusia por grados para indicar la cantidad de pérdida auditiva que muestra la audiometría de tonos puros.

Tabla 1. La siguiente tabla muestra una forma habitual de clasificar la hipoacusia [6].

Grado de hipoacusia	Rango de hipoacusia (dB HL)
Normal	-10 a 15
Ligera	16 a 25
Leve	26 a 40
Moderada	41 a 55
Moderadamente severa	56 a 70
Severa	71 a 90
Profunda	91+

3. RELACIÓN SEÑAL RUIDO (SNR)

Muchos ruidos de fondo de la vida real fluctúan rápidamente y las personas con audición normal extraen fragmentos útiles de información durante los momentos más débiles del ruido de fondo, lo que se conoce como escuchar en los huecos. Las

personas con hipoacusia pierden parcialmente esta capacidad de oír durante los huecos de un ruido de fondo, sobre todo si son mayores. La capacidad de oír sonidos débiles durante los breves intervalos de un enmascarador más intenso disminuye gradualmente a medida que empeora la hipoacusia. Las personas con deficiencias auditivas necesitan invariablemente una SNR más alta para comprender el habla. [7].

Las personas con hipoacusia de origen coclear tienen más dificultades en entender el habla en un entorno ruidoso que las personas con audición normal o con hipoacusia conductiva o mixta. Plomp (1994) describió una serie de pesquisas que medían los umbrales de reconocimiento del habla para frases en entornos ruidosos. Los resultados fueron presentados en SNR necesaria para conseguir 50% de comprensión del material verbal. Invariablemente, las personas con hipoacusias cocleares necesitaban un aumento de señal en relación al ruido para la comprensión. El aumento necesario varió de 2,5 dB para hipoacusias leves a 7 dB para hipoacusias de moderadas a severas. Un aumento aún más grande en la SNR fue cuando el ruido fluctuaba. El aumento necesario del habla para obtener umbrales, en este tipo de ruido competitivo, puede variar de 9 a 25 dB. [8].

La Figura 1 muestra las medias y las desviaciones estándar de la prueba adaptativa de Palabras en Ruido (WIN; Wilson 2003) del conjunto de datos de Wilson (2011). En este procedimiento se obtiene el nivel SNR para lograr un 50% de aciertos. Esta medida se representa en función del grado de hipoacusia propuesto por la Organización Mundial de Salud (OMS). A medida que aumentaba la gravedad de la discapacidad auditiva, se necesitaba una SNR cada vez mayor para alcanzar una precisión de reconocimiento del 50%. [9].

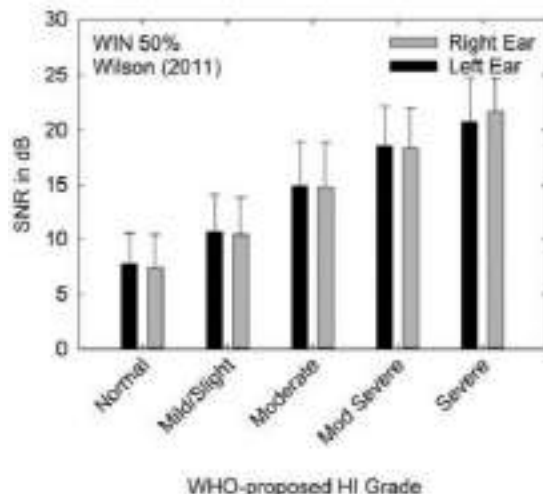


Figura 1. Media y desviaciones estándar para la prueba WIN con habla competitiva en función del grado de hipoacusia propuesto por la OMS para ese mismo oído. Se muestran por separado en color negro los datos de los oídos izquierdos y en color gris los derechos [9].

4. ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO DE SONIDO

La investigación del mercado muestra que la mejora de la comprensión verbal es una de las necesidades más importantes que manifiestan los usuarios de audífonos [2].

Las soluciones auditivas modernas ofrecen diversas estrategias de tratamiento de sonido para mejorar la SNR de las personas con pérdida auditiva.

Han pasado por varias eras y la verdadera revolución llegó cuando la propia forma de onda sonora se convirtió en una serie de números y se manipuló mediante circuitos digitales, la era digital. La investigación sobre el procesamiento digital comenzó en la década de 1960 en los Laboratorios Bell. Sin embargo, debido a la velocidad de los ordenadores, los cálculos necesarios no podían realizarse con la suficiente rapidez para que la señal saliera del audífono con la misma rapidez con la que se introducía la señal. No fue hasta finales de los años setenta que los ordenadores fueron lo bastante rápidos para que la salida siguiera el ritmo de la entrada y hasta la década de 1980, donde el consumo de energía y el tamaño fue disminuido lo suficiente como para fabricar un audífono que se pudiera llevar. En 1986 estos circuitos de control digital y memoria sustituyeron a los potenciómetros y como ocupaban poco espacio dentro del audífono, se podían incluir muchos "controles" en un audífono. De este modo, los circuitos permitían ajustar características de amplificación de los audífonos con mayor flexibilidad y precisión. Como el primer audífono era corporal y hacía esencialmente al sonido lo mismo que los audífonos analógicos, no fue un éxito comercial y dejó de comercializarse rápidamente. Finalmente, en 1996, los audífonos totalmente digitales estuvieron disponibles comercialmente. [7].

Las ventajas que ya se observan para la tecnología digital incluyen [7]:

- Aumentos adicionales en la flexibilidad y precisión con las que se pueden controlar la configuración de la respuesta y las características de compresión.
- Manipulación automática inteligente de la ganancia y la respuesta en frecuencia del audífono dependiendo de la cantidad de señal y ruido que el audífono estima que llega en cada región de frecuencia.
- Manipulación inteligente de la forma en la que varía la ganancia para los sonidos procedentes de diferentes direcciones (es decir direccionalidad), de modo que se minimice el ruido.
- Aumento de ganancia sin que se produzcan oscilaciones de retroalimentación.
- Reducción del tamaño y de la energía requerida de la batería, en relación con una ayuda analógica que manipula sonido de la misma manera.
- Disminución de la frecuencia de los sonidos de alta frecuencia que transportan información crucial del habla, con el objetivo de que se puedan percibir en una gama de frecuencias en la que el usuario tiene una mejor audición.

- Audífonos que aprenden y luego aplican automáticamente las preferencias de amplificación del usuario en distintos entornos.

La era inalámbrica también llegó a los audífonos e hizo posible la transmisión de señales sin la degradación causada por el ruido y la reverberación que inevitablemente acompañan a la propagación de ondas sonoras. Aunque los audífonos se han podido conectar mediante cable a receptores inalámbricos durante muchos años, cada vez más receptores inalámbricos se integran o encajan en audífonos. [7].

Hay cuatro aplicaciones amplias [7]:

- Recepción remota: para recibir señales enviadas a través de una habitación desde un micrófono y un transmisor que porta el interlocutor.

- Control coordinado de audífonos bilaterales: para ajustar manual o automáticamente la amplificación en los audífonos izquierdo y derecho de manera sincronizada.

- Conectividad a dispositivos de comunicación: para recibir señales de audio desde dispositivos como teléfonos móviles, ordenadores, reproductores de audio personales o sistemas de navegación por satélite.

- Audífonos de matriz binaural: para proporcionar una conexión de audio completa de los audífonos izquierdo y derecho, permitiendo así una audición superdireccional que mejora la inteligibilidad del habla en lugares ruidosos.

La primera y la última de estas opciones permiten un aumento de la inteligibilidad en el ruido que supera con creces cualquier cosa que se pueda lograr sin transmisión inalámbrica. Además, ofrecen la posibilidad de que en lugares ruidosos, las personas con hipoacusia oigan incluso mejor que las personas con audición normal. Si es así, los audífonos ya no indicarán que el usuario tiene una discapacidad, sino que indicarán que el usuario tiene una súper audición. Esto debería aumentar drásticamente tanto el uso de audífonos por parte de las personas con hipoacusia como el beneficio y la satisfacción experimentados por quienes los usan [7].

4.1. Direccionalidad

El beneficio proporcionado por un micrófono direccional depende de la direccionalidad del audífono, las características de reverberación de la situación auditiva, la distancia del interlocutor y las fuentes de ruido. En absoluto depende del material de habla utilizado para evaluar el beneficio. La SNR en el entorno puede afectar el grado de beneficio que ofrecen los micrófonos direccionales adaptativos, pero no el que ofrecen los conjuntos fijos. Definamos el beneficio de un micrófono direccional como la cantidad en la que se debe aumentar el ruido cuando el micrófono direccional reemplaza a un micrófono omnidireccional para que la inteligibilidad. [7].

El fabricante de audífonos Phonak lanzó en 2010 UltraZoom (UZ), un formador de haces adaptativo monoaural multibanda que ayuda a mejorar la SNR. Este se diseñó para

ayudar a los usuarios a comprender el habla que proviene desde delante en entornos ruidosos. Es un haz lo suficientemente amplio como para permitir una percepción general de los sonidos (conciencia del entorno), sin embargo a medida que el sonido se torna más intenso y más difuso, el haz más amplio capta tanto el ruido como el habla y es posible que un sistema monoaural como este no pueda separar la fuente del ruido de la señal verbal objetivo. [2].

En 2012 Phonak presentó StereoZoom (SZ), es un sistema binaural de formación de haces que combina las señales de cuatro micrófonos, situados dos a la izquierda y dos a la derecha, a través de una conexión inalámbrica. Esto permite crear un patrón de forma de haces estrecho diseñado para ofrecer una mejor SNR. Con un nivel de ruido definido, que se usa como nivel de activación, los micrófonos de ambos audífonos funcionan juntos para enfocarse en los sonidos que provienen directamente desde delante, al tiempo que minimizan el ruido simultáneo desde todas las direcciones. Por lo tanto, el oyente puede concentrarse en la conversación. Varios estudios han demostrado una mejor inteligibilidad verbal con SZ en comparación con otras tecnologías de formación de haces en dispositivos de Phonak y dispositivos de la competencia. Schulte et al., (2018) observaron un aumento considerable en el nivel de interacción social al usar SZ. [2].

En 2022 Phonak lanzó StereoZoom 2.0, que es una combinación de UZ y SZ cuyo objetivo es mantener más conciencia espacial con niveles más bajos de activación (ruido), o concentración en el habla (mayor enfoque cuando aumenta el ruido), según el entorno auditivo (Fig. 2) [2].



Figura 2. StereoZoom 2.0 [2].

Además, de ser automático si el usuario desea controlar el nivel de foco en función de a quién desea escuchar en entornos difíciles puede hacerlo de forma manual y en tiempo real desde la aplicación myPhonak.

De hecho, se ha demostrado mediante mediciones técnicas que SZ 2.0 proporciona una relación SNR 3,0 dB mejor en comparación con Real Ear Sound que es otra direccionalidad de Phonak que simula el efecto “pinna” para restaurar el patrón de directividad natural del oído externo. Al

tener la capacidad de aumentar la intensidad del foco comparado SZ proporciona 2,5 dB adicionales de SNR. [2].

4.2. Reducción de ruido adaptativo

El ruido se puede reducir de tal manera que mejore la comodidad auditiva y reduzca el esfuerzo auditivo y existen varias técnicas para lograrlo. Las técnicas de reducción de ruido adaptativa tienen varios sinónimos, incluida la supresión de ruido, la cancelación de ruido a escala fina, la reducción de ruido con un solo micrófono y la reducción de ruido digital. [7].

En la figura 3 podemos ver los varios reductores de ruido disponibles actualmente en un audífono de gama Premium de Phonak:

- Cancelador de Ruido Dinámico (CRD): funciona en conjunto con la direccionalidad del micrófono (UZ y SZ 2.0) para reducir el ruido de los lados y de atrás y mejorar el habla desde el frente, pudiendo mejorar la SNR hasta 4 dB.

Un estudio realizado por Hörzentrum Oldenburg en 2020 reveló que el CRD reduce el esfuerzo auditivo comparado con un reductor de ruido anterior (SNR-Boost), como se puede ver en la figura 4 [10].

- SoundRelax: reduce los ruidos fuertes y repentinos como, por ejemplo, el golpear de una puerta o ruido de platos.

- NoiseBlock: reductor de ruido ambiental que funciona por canales, donde se detecta una SNR negativa baja la ganancia en ese canal.

- Reducción de Ruido Suave: ajusta los sonidos de entrada muy suaves como, por ejemplo, el ruido de los ventiladores o los aires acondicionados.

- Windblock: reductor del ruido de viento.

- Whistleblock: cancela la realimentación transitoria creada en el mundo real como, por ejemplo, al usar un sombrero o dar un abrazo.



Figura 3. Imagen del software de adaptación Phonak Target de una programación simulada con audífonos de tecnología Premium.

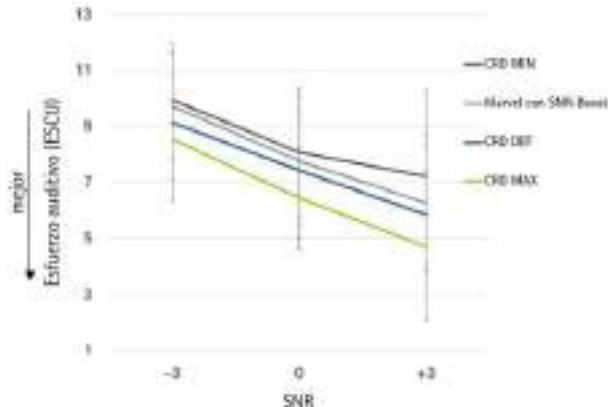


Figura 4. Calificación ACALES del esfuerzo auditivo para CRD en los ajustes apagado, DEF y MAX, para Audéon M90-R con SNR-Boost activado. ESCU = Unidad Categórica de Escalado del Esfuerzo, proveniente del concepto inglés *Effort Scaling Categorical Unit*. 1 = sin esfuerzo, 13 = cantidad extrema de esfuerzo [10].

5. MICRÓFONOS REMOTOS

El propósito de un micrófono inalámbrico remoto es captar una señal de interés y enviarla de forma inalámbrica a un receptor que está conectado a un altavoz (configuración de campo sonoro) o al audífono (configuración personal). Esto envía una señal clara y de alto nivel que está menos contaminada por la reverberación y/o el ruido de fondo que la señal recibida en el micrófono del audífono. Al enviar esta señal más limpia al audífono, podemos superar muchos de los efectos nocivos de la distancia, la reverberación y el ruido que a menudo ocurre en los entornos de comunicación cotidianos. En el uso doméstico, se pueden usar estos sistemas para permitir un acceso claro a la voz del cuidador, en el coche, en patios de recreo, en centros comerciales u otras situaciones donde la distancia, el ruido y la reverberación pueden inhibir la comunicación efectiva. [11].

En un estudio realizado por Thibodeau en 2020 sobre los beneficios en el reconocimiento de voz en ruido con micrófonos inalámbricos remotos en entornos grupales, se ha demostrado que el micrófono Roger Select (Phonak) puede proporcionar beneficios significativos en el reconocimiento de voz en ruido en comparación con el uso de audífonos/implantes cocleares solos (61 %) [12].

La tecnología de los micrófonos Roger no se basa solo en captar y enviar la voz de los interlocutores, también analiza el entorno para tener un comportamiento de micrófono adaptativo digital. Lo puede hacer de dos formas:

- Adaptativo estándar, a medida que aumenta el ruido aumenta la señal Roger hasta +20 dB.
- Adaptativo dual, cuando el ruido aumenta, aumenta la señal Roger hasta +10 dB y si el ruido sigue aumentando, atenúa el micrófono del audífono hasta -10 dB).

Se puede seleccionar una u otra opción desde el software de adaptación Phonak Target. Esto permitirá escuchar aún mejor en situaciones de ruido.

En entornos educativos, es posible configurar estos sistemas no solo para admitir un acceso claro a la voz de un profesor sino también puede permitir múltiples interlocutores e interfaz con equipos como ordenadores y sistemas de proyección en la [11].

Para la acústica de las aulas no ocupadas, American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) recomienda que los niveles de ruido no superen los 35 dB(A) y que el tiempo de reverberación no supere los 0,6 segundos en las aulas más pequeñas y 0,7s en las más grandes [13].

Se realizó un estudio en 8 escuelas públicas del centro de Ohio. Las mediciones de los tiempos de reverberación y los niveles de ruido de fondo en 32 aulas de primaria desocupadas revelaron que, en promedio, el ruido de fondo tendía a ser entre 5 y 15 dB más alto de lo recomendado. Los niveles de ruido oscilaron entre 34,4 y 65,9 dB(A) y, sólo 4 de 32 aulas, tenían niveles de ruido de fondo inferiores a 35 dB(A). El mismo estudio también reveló que las mediciones del tiempo de reverberación oscilaron entre 0,2 y 1,27 s y, 13 de las 32 aulas, excedieron el tiempo de reverberación máximo de ASHA de 0,6 segundos para salas más pequeñas [14].

Otro estudio realizado en Nueva Escocia, Canadá, investigó los efectos de los sistemas de amplificación de campos sonoros en el rendimiento de los estudiantes en clase. Este estudio reveló que los sistemas de campo sonoro aumentan efectivamente la relación señal-ruido en las aulas y ayudan a los niños a prestar atención, escuchar y comprender mejor al maestro [15].

6. CONCLUSIÓN

De los varios tipos de hipoacusia, la neurosensorial es la que representa mayores dificultades para comprender en entornos ruidosos y, a medida que aumenta el grado de la hipoacusia, mayor debe ser la SNR para que puedan entender mejor.

Las estrategias de tratamiento de sonido son fundamentales para conseguir la mejora de SNR deseada por los usuarios de audífonos. Éstas han evolucionado mucho en estos años. Sin embargo, hemos visto que el apoyo de micrófonos remotos en una adaptación con audífonos puede ayudar aún más a combatir el ruido fuerte, la distancia y la reverberación tanto para adultos como en entornos educativos. Por eso, en la rehabilitación auditiva se debe tener en cuenta todas las necesidades de los pacientes para decidir si es suficiente solo con el uso de audífonos o si también debemos incorporar el uso de micrófonos remotos.

Teniendo en cuenta todos estos datos, podemos comprobar la gran importancia de la tecnología en el día a día de los usuarios de audífonos para tener la mejor audición posible.

7. REFERENCIAS

- [1] Vercammen C., Ferguson, M., Kramer, S., Meis, M., Singh, G., Timmer, B., Gagné, J. P., Goy, H., Hickson, L., Holube, I., Launer, S., Lemke, U., Naylor, G., Picou, E., Scherpiet, S., Weinstein, B. Pelosi, A. (2020). Well-hearing is well-being: A Phonak position statement about why hearing healthcare is vital for healthy living. *The Hearing Review*, 27(3):18-22.
- [2] Woodward, J., Kuehnel, V., et Latzel, M. (2022). *Soluciones innovadoras de comprensión verbal: Lumity con Phonak SmartSpeech™ Technology*. Phonak Insight.
- [3] Salesa, E., Perelló, E., Bonavida, A. (2013). *Tratado de audiolología* (2ª ed.). Elsevier Masson
- [4] Reis, J. (2002). *Surdez diagnóstico e reabilitação*. Servier
- [5] Angulo, A., Blanco, J., Mateos, F. (1997). *Audioprótesis: Teoría y práctica*. Masson, S.A.
- [6] American Speech-Language-Hearing Association. *Degree of Hearing Loss*. <https://www.asha.org/public/hearing/degree-of-hearing-loss/>
- [7] Dillon, H. (2012). *Hearing Aids* (2ª ed.). Boomerang Press
- [8] Almeida, K., Lorio, M. (2003). *Próteses Auditivas Fundamentos Teóricos & Aplicações Clínicas* (2ª ed.). Lovise
- [9] Humes, L. (2018). The World Health Organization's hearing-impairment grading system: an evaluation for unaided communication in age-related hearing loss. *National Library of Medicine: National Center for Biotechnology Information*, 58(1), 12–20. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6351193/>
- [10] Appleton-Huber, J. (2020). *AutoSense OST™ 4.0: esfuerzo auditivo significativamente menor y preferido por la inteligibilidad verbal*. Phonak Field Study News.
- [11] Katz, J., Chasin, K., Hood, L., Tillery, K. (2015). *Handbook of Clinical Audiology* (7ª ed.). Wolters Kluwer
- [12] Thibodeau L. M. (2020). Benefits in Speech Recognition in Noise with Remote Wireless Microphones in Group Settings. *Journal of the American Academy of Audiology*, 31(6), 404–411. <https://doi.org/10.3766/jaaa.19060>
- [13] American Speech-Language-Hearing Association. (2005). *Acoustics in educational settings: [Position statement]*. Recuperado de: www.asha.org/policy
- [14] Knecht, H.A., Nelson, P.B., Whitelaw, G.M. & Feth, L.L. (2002). Background noise levels and reverberation times in unoccupied classrooms: Predictions and measurements. *American Journal of Audiology*, 11, 65-71.
- [15] Langlan, L.A., Ravichandran, S., Caissie, R., Kreisman, B.M. (2009). The benefit of soundfield amplification in First Nations elementary school children in Nova Scotia, Canada. *The Australian and New Zealand Journal of Audiology*, 31(2), 55–71.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

ELA-0 Instrumentación y medidas acústicas. Electroacústica.

MEDICIÓN EN CAMPO CERCANO DEL RUIDO EMITIDO POR TRENES DE ALTA VELOCIDAD: POSIBILIDADES Y RETOS

Jaume Solé Bosquet ^{1*}
Pierre Huguenet ²

^{1,2} SENER Mobility S.A.U.

RESUMEN

La progresiva implantación de líneas ferroviarias de alta velocidad junto con la creciente preocupación por el impacto ambiental que conllevan ha destacado la necesidad de aminorar su emisión de ruido hasta niveles que puedan resultar aceptables. En ferrocarriles de alta velocidad cobra importancia el ruido aerodinámico, difícil de atenuar por emitirse a mayor altura. Por ello, los requisitos de emisión de ruido aerodinámico en nuevas unidades deben ser exigentes y debe ser posible evaluar cuantitativamente y de manera sencilla las diferentes contribuciones. El artículo presenta una posibilidad sencilla para lograrlo, indicando los retos asociados y las vías adecuadas para superarlos.

ABSTRACT

High speed railway lines are increasingly being operated in many countries, often with remarkable commercial success. In parallel, environmental issues related to noise emissions are gaining importance. On top on classic railway noise sources (motor, rolling noise) high speed lines have significant aerodynamic noise emissions. Some of the most important of these aerodynamic noise emissions are placed in the upper parts of the train, and for this reason are harder to mitigate by means of conventional noise barriers. For this reason, aerodynamic noise requirements for new rolling stock shall be demanding and numerically evaluable in a reasonably simple way. This article presents a straightforward approach for achieving this numerical evaluation of aerodynamic noise emission levels in high-speed trains, indicating the challenges involved and possible strategies for overcoming them.

Palabras Clave— high-speed railways, aerodynamic noise, noise apportionment, near field, high pressure microphones, Aeronoise, HS2, Shift2Rail, TRAFIC, pass-by measurements.

* **Autor de contacto:** jaume.sole@sener.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente implantación de líneas ferroviarias de alta velocidad, unida a la cada vez mayor sensibilidad ambiental con respecto a sus emisiones asociadas de ruido, han motivado la realización de múltiples estudios especializados al respecto. Una de las iniciativas recientes más remarcables es el proyecto “Aeronoise”, de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC). Este proyecto se ha orientado a proponer una nueva metodología de medición de ruido al paso de unidades ferroviarias, tal que cumpla los siguientes requisitos:

- Permita discernir (de manera cuantitativa) las contribuciones de ruido aerodinámico, particularmente las originadas en las partes más altas del tren (por ser más difíciles de atenuar mediante barreras acústicas).
- El procesado de la información medida debe ser sencillo en comparación con los procesados usuales en mediciones utilizando *arrays* de micrófonos.
- La instrumentación debe utilizar micrófonos de medición comerciales (disponibles en catálogo de fabricantes especializados) y de coste moderado.

El proyecto *Aeronoise* se encuentra actualmente en fase de finalización, esperándose la publicación del informe final con los detalles de la metodología propuesta para finales de 2023.

2. VENTAJAS DE LAS MEDICIÓN EN CAMPO CERCANO DEL RUIDO FERROVIARIO AL PASO

Las mediciones de ruido ferroviario al paso clásicas, a las distancias-tipo de 7.5m y 25m según el estándar ISO-3095 [1], presentan el inconveniente de que las contribuciones de las diferentes fuentes aparecen ya muy mezcladas en los puntos de medición. Ello es así dado que la diferencia de distancias entre el punto de emisión y el punto de medición

es baja, y también a que suele existir visibilidad directa entre el punto de emisión de cada fuente de ruido y el punto de medición en dicho *set-up*.

Con respecto a la instrumentación convencional definida en el estándar ISO-3095, las ventajas asociadas a una estrategia de medición de ruido en campo cercano son las siguientes:

- La diferencia comparativa de distancias entre el punto de emisión de cada fuente de ruido y las diferentes posiciones de medición puede ser más grande, favoreciendo la identificación de fuentes dominantes y su cuantificación.
- Es posible aprovechar el propio cuerpo del tren como apantallamiento de unas fuentes de ruido respecto de otras, con la consiguiente mejora en la identificación de fuentes.

Ambas ventajas redundan en una mayor posibilidad de identificar y cuantificar por separado las diferentes fuentes de ruido implicadas.



Figura 1. Antecedentes de mediciones en campo cercano de ruido al paso de una unidad de alta velocidad, realizadas en la red de Adif en el marco del proyecto de alta velocidad británico HS2 [2].

3. RETOS ASOCIADOS A LAS MEDICIONES EN CAMPO CERCANO DE RUIDO AL PASO DE UNIDADES DE ALTA VELOCIDAD

En paralelo a las ventajas, la realización de mediciones en campo cercano de ruido al paso de trenes de alta velocidad presenta diferentes retos de orden práctico. Los más relevantes son los siguientes:

- Necesidad de un soporte cercano para los micrófonos que esté sólidamente fijado y no plantee el riesgo de caer accidentalmente en la vía y e impactar con el tren. Los trípodes clásicos, en función de su altura y distancia, pueden plantear problemas serios al respecto.
- Consideraciones de seguridad. Los problemas asociados son dobles: el riesgo de colisión de soportes o sensores contra la vía, y el riesgo

eléctrico en caso de contacto accidental con la catenaria en micrófonos instalados a gran altura.

- Saturación de las membranas de los micrófonos por la onda de presión cuasi-estática a la llegada del tren (ver figura 2). Esta onda cuasi-estática de alta presión puede invalidar cualquier medición acústica al inicio del paso del tren, particularmente en los micrófonos situados a menor altura a causa del efecto suelo en la presión.



Figura 2. Saturación de la membrana de los micrófonos de medición bajos cercanos debido al pico de presión cuasi-estático al inicio del paso del tren. Datos obtenidos en los ensayos de referencia para HS2 en la red de Adif [2].

4. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

La experiencia previa alcanzada indica que las dificultades identificadas en la sección anterior pueden ser abordadas con éxito, de acuerdo con las siguientes estrategias:

- Aprovechamiento de estructuras preexistentes al lado de la vía, tales como postes o portales de catenaria. Estas estructuras presentan la ventaja de estar sólidamente cimentadas y constituir una base robusta para la instalación de micrófonos, con una mínima distorsión en la medida a causa de reflexiones en su propia superficie.
- Justificación de la seguridad de las medidas en base a los siguientes factores: mínima masa de los sensores asociados (menor a la de un pájaro que pudiera accidentalmente impactar en el tren), fijación segura de cables mediante bridas de seguridad (incluso de acero si las circunstancias lo aconsejan), instrumentación y des-instrumentación de la vía fuera de su horario de operación.

- Uso de micrófonos especiales planos de alta presión (ver figuras 3 y 4), disponibles comercialmente con capacidades de medición de hasta 184 dB.



Figura 3. Ejemplo de micrófono comercial plano de alta presión (modelo GRAS 48LA), capaz de medir 184 dB.



Figura 4. Instrumentación vibro-acústica en campo cercano utilizando un micrófono comercial plano instalado en la traviesa de una línea de alta velocidad, combinado con acelerómetros instalados en el raíl [2].

4. AERONOISE: HACIA UNA PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA EXTENDIDA

Tomando como base la experiencia adquirida durante los ensayos de mediciones en campo cercano realizados en la red española de Adif por encargo de HS2, se ha desarrollado a instancias de la UIC una nueva metodología de medición acústica. Esta metodología, desarrollada en el ámbito del proyecto UIC *Aeronoise*, consiste en una propuesta de instrumentación y postproceso comparativamente simple, capaz de proporcionar una cuantificación espacial discreta de las diferentes fuentes de ruido implicadas en el paso a alta velocidad de una unidad ferroviaria. Más concretamente, la propuesta se basa en una instrumentación con 6 micrófonos instalados a diferentes alturas en un poste de catenaria (ver

figura 5), a una distancia de referencia de 300cm al eje de la vía. El uso de postes de catenaria como soporte de los micrófonos, aun no siendo imprescindible, resulta conveniente desde el punto de vista de la simplicidad y de la seguridad (cabe destacar que dichos postes, además de su solidez estructural, están siempre derivados a masa eléctrica).

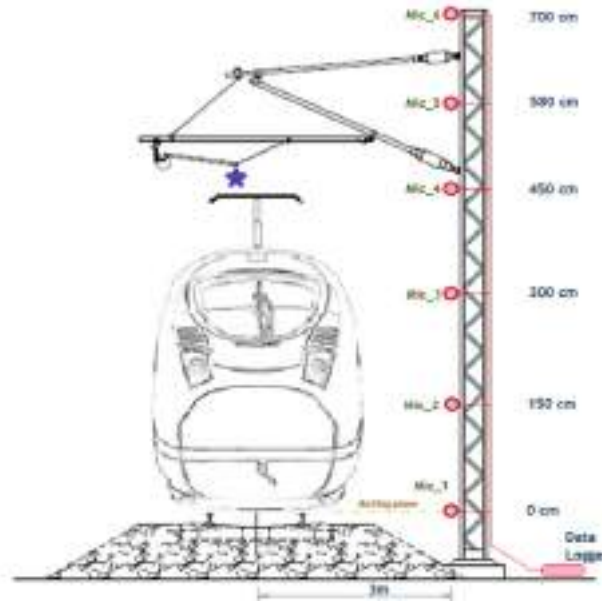


Figura 5. Instrumentación en campo cercano propuesta en el marco del proyecto *Aeronoise* de la UIC [3].

Las siguientes subsecciones detallan los tres pasos fundamentales en la estimación de los niveles de emisión de ruido a diferentes alturas, a partir de los niveles de ruido medidos en los 6 micrófonos de referencia en la figura 5.

5.1. Cálculo preliminar de factores de visibilidad acústica

El primer paso en la metodología consiste en el cálculo de los factores de transferencia entre las fuentes lineales de emisión de ruido consideradas en el modelo (ver figura 6) y los diferentes micrófonos en el *set-up* mostrado en la figura 5. Estos factores de transferencia son referenciados como *factores de visibilidad acústica*; nomenclatura escogida por reflejar de manera intuitiva el papel del cuerpo del tren en el enmascaramiento relativo de las diferentes fuentes de ruido en los diferentes puntos de medición acústica descritos en la figura 5.

El cálculo de dichos *factores de visibilidad acústica* puede realizarse mediante simulación acústica de trazado masivo de rayos, utilizando al efecto herramientas especializadas (ver figura 7). Si bien se trata de una tarea que comúnmente se reserva a técnicos especializados, el método *Aeronoise* propone como alternativa simplificada el uso de factores de visibilidad acústica pre-calculados. Estos factores de visibilidad acústica pre-calculados pueden encontrarse en el

documento metodológico del proyecto *Aeronoise* [3], para las posiciones de medición y fuentes de ruido indicadas en las figuras 5 y 6 respectivamente. Se ofrecen en dicho documento dos diferentes juegos de factores de visibilidad precalculados, uno calculado con la sección típica de un tren de alta velocidad y un piso, y otro con la sección típica de un tren de alta velocidad de dos pisos.

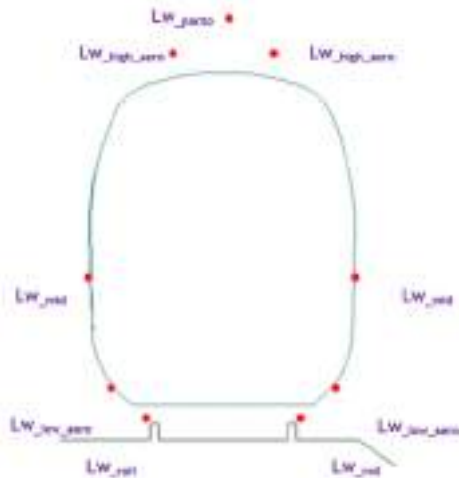


Figura 6. Fuentes elementales de ruido ferroviario previstas en el proyecto *Aeronoise* [3]. Para las fuentes situadas por debajo del techo del tren cada fuente se divide en dos de igual nivel de emisión, situadas cada una a un lado del tren.

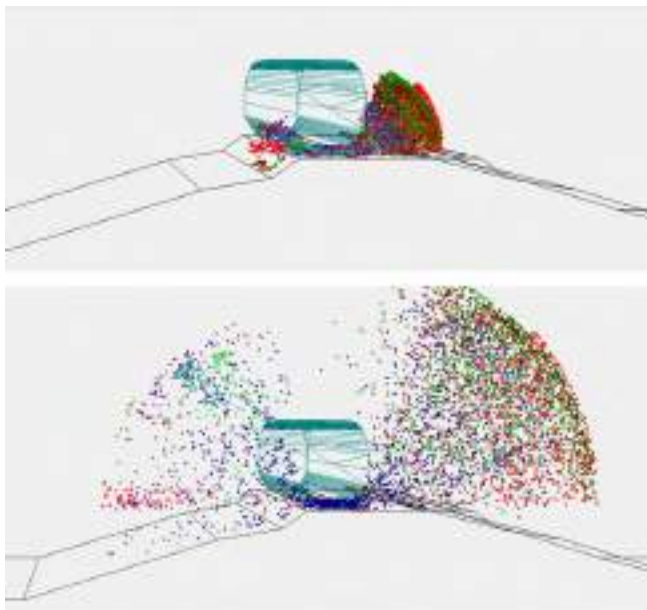


Figura 7. Estimación analítica de factores de visibilidad acústica en un tren tipo utilizando software especializado de trazado de rayos acústicos (*Odeon*).

5.2. Resolución del sistema no lineal de ecuaciones asociado

Una vez estimados analíticamente los factores de visibilidad acústica, se procede a resolver el sistema de ecuaciones (no lineal si se ha planteado en dB), obteniéndose con ello la estimación de la potencia de emisión de cada una de las fuentes. Siendo el número de micrófonos superior al número de incógnitas de emisión (aunque algunas estén divididas en dos mitades iguales a cada costado del tren) el sistema típicamente alcanza solución. El procedimiento *Aeronoise* reportado en [3] incluye una serie de parámetros y directivas concretas para realizar dicha resolución utilizando el *solver* no lineal de la aplicación *Excel*, ampliamente disponible. La batería de pruebas realizada durante el desarrollo del método muestra, para el caso de fuentes con niveles conocidos, que el nivel de acierto obtenido es muy alto, salvo en el caso de las fuentes a bajo nivel (ruido de rodadura y aerodinámico). Por su cercanía espacial, la separación entre ambas fuentes requiere de procedimientos específicos que se describen resumidamente en la siguiente sección.

5.3. Separación del ruido de rodadura del aerodinámico a bajo nivel

Como se ha indicado, la separación de las fuentes situadas a baja altura (ruido de rodadura y ruido aerodinámico a baja altura) resulta inviable mediante el procedimiento descrito previamente, dada la cercanía espacial de ambas fuentes. Es posible, sin embargo, cuantificar globalmente mediante dicho procedimiento el conjunto de ambas emisiones a baja altura, y aplicar a posteriori técnicas específicamente diseñadas para alcanzar esta separación. El documento metodológico redactado dentro del proyecto *Aeronoise* [3] recoge diferentes sugerencias al respecto. Las sugerencias al respecto en dicho documento van desde las más sencillas basadas en leyes empíricas validadas en estudios previos, hasta las más avanzadas basadas en la medición de la rugosidad del raíl, el uso de software especializado de evaluación del ruido de rodadura (*TWINS*) u otras alternativas de reciente desarrollo analizadas dentro del proyecto europeo Shift2Rail TRANSIT [4][5].

5.4. Refinamiento en la separación de ruido aerodinámico del pantógrafo y el ruido aerodinámico general a nivel de techo

Si bien el método anteriormente descrito permite alcanzar una razonable discriminación entre el ruido del pantógrafo, es posible mejorar dicha discriminación con técnicas alternativas. Las dos más destacables son las siguientes:

- Realización de diferentes pasos a la misma velocidad, unos con el pantógrafo levantado y otros con el pantógrafo bajado y tren moviéndose por inercia. De la comparación de niveles medidos es posible estimar la intensidad de emisión de ruido del pantógrafo por

separado (ver figura 8), y de ahí la remanente de nivel de ruido aerodinámico emitido a la altura del techo del tren.

- Aprovechando la circunstancia de ser el pantógrafo la fuente de ruido dominante a alta y muy alta velocidad en el indicador $L_{p_{max}}$ es posible estimar la intensidad de emisión del pantógrafo asumiendo que en el micrófono más alto del *set-up*, durante el momento del máximo de ruido, el resto de fuentes de ruido son comparativamente negligibles en comparación con el pantógrafo. A partir de esta primera cuantificación y conociendo el valor del conjunto resulta posible cuantificar separadamente los niveles de emisión de ruido aerodinámico en la parte alta del tren.

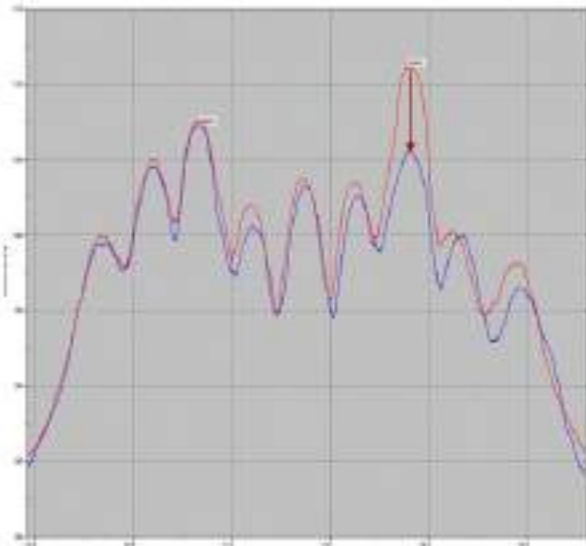


Figura 8. Cuantificación del ruido de pantógrafo mediante pasos sucesivos con el pantógrafo levantado y bajado. Puede observarse la bajada en el pico de emisión del pantógrafo en el paso de la unidad con el mismo bajado.

6. CONCLUSIONES

La conclusión fundamental del presente artículo es que resulta posible alcanzar una razonable separación experimental de las diferentes contribuciones de ruido al paso de unidades de alta velocidad mediante un montaje en campo cercano utilizando un número moderado de micrófonos y de acuerdo con un procesado sencillo. Se han identificado los potenciales problemas, ofreciéndose vías concretas de solución.

Como se ha mencionado en la presente contribución, esta metodología ha nacido de los trabajos previos realizados para HS2 en la red española de alta velocidad de Adif, y ha constituido la base de los recientes desarrollos en el proyecto *Aeronoise* de la UIC, cuya propuesta metodológica completa en sus detalles es, como se ha mencionado, de inminente publicación [3].

7. REFERENCIAS

- [1] International Standards Organisation *ISO 3095:2013 "Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles"*.
- [2] Solé Bosquet Jaume, Huguenet Pierre, Sica Gennaro, "Pass-by noise assessment of high-speed units by means of acoustic measurements in a perimeter close to the train" 13th International Workshop on Railway Noise (IWRN13), 2019.
- [3] UIC Aeronoise Team "Measurement and analysis systems to characterize the aerodynamic noise of high-speed trains - Technical Report: Methodology" (to be published before December 2023).
- [4] Shift2Rail TRAFIC project deliverable D2.1 "Train pass-by noise source characterization and separation tools for cost-effective vehicle certification. Report on state of the art, strategy, and requirements for new separation techniques", September 2020.
- [5] Shift2Rail TRAFIC project deliverable D3.2 "Train pass-by noise source characterization and separation tools for cost-effective vehicle certification. Track and vehicle separation and transposition techniques including theoretical description and proposal for full scale validation test campaign", January 2022.
- [6] UIC Aeronoise Team "Measurement and analysis systems to characterize the aerodynamic noise of high-speed trains - Technical Report: Benchmark Studies", June 2022.
- [7] A.Martens, J.Wedemann, N.Meunier, A.Leclere "High speed train noise – Sound source localization at fast passing trains" Forum Acusticum Sevilla, 2002.
- [8] X.Liu, J.Zhang, D.J. Thompson, E.L. Iglesias, G. Squicciarini, M. Toward and D. Lurcock "Aerodynamic noise of high-speed train pantographs: comparisons between field measurements and an updated component-based prediction model" *Journal of Applied Acoustics*, 175, 2021.
- [9] M.Genescà, J.Solé, J.Romeu, G.Alarcón "Pantograph noise measurements in Madrid-Sevilla high speed train (AVE)" *Internoise 2004*.
- [10] H.M.Noh "Noise-source identification of a high-speed train by noise source level analysis" *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: Journ. Rail and Rapid Transit* 0(0) 1–12, 2016.
- [11] Zhao Yue-Ying, Yang Zhi-gang, Li Qi-Liang, Xia Chao, "Analysis of the near-field and far-field sound pressure generated by high-speed trains pantograph system", *Applied Acoustics* 169, 2020.
- [12] Solé Jaume, Huguenet Pierre, Sica Gennaro, "Evolution of pantograph noise directivity at increasing speeds", *INTER-NOISE 2019, 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, Madrid, Spain, 2019.
- [13] Janssens, M.H.A., Dittrich, M.G., de Beer F.G., Jones C.J.C. "Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay" *Journal of Sound and Vibration* 293 (2006) 1007–1028.

ACCURACY AND PERFORMANCE TESTS OF A WIRELESS GEOREFERENCED NOISE SENSOR FOR MOBILE NOISE SAMPLING

G. Quintero (Guillermo Quintero Perez)^{1*}

*A. Balastegui (Andreu Balastegui Manso)*¹

*J. Romeu (Jordi Romeu Garbi)*¹

¹Laboratory of Acoustics and Mechanical Engineering (LEAM), Polytechnic University of Catalonia, Colom 11, Terrassa, Barcelona, 08222, Spain

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSN) have been expanded due, among many other things, to the advances in technology and the cost reductions of electronic components, which allows to produce low-cost and low-power sensor nodes. With the aim of creating a WSN for automatic noise mapping, this paper evaluates the acoustical performance of an environmental noise sensor node for mobile sampling made-out of low-cost components. The sensor is composed of a low-power microcontroller together with a MEMS microphone, a Global Navigation Satellite System (GNSS) and a Low Power Wide Area (LPWA) wireless module. Acoustical tests were carried out to validate the sensor accuracy which could be compared to a Class 2 Sound Level Meter for L_{eq} , L_{Aeq} and one-third octave band spectrum (63 Hz - 10 kHz). Moreover, signal processing, data management, low-power modes, among other tasks refinement, showed that the power consumption can be improved considerably.

Keywords – IoT, Wireless noise sensor, Low-power sensor, Mobile noise mapping

1. INTRODUCTION

Among many other things, Wireless Sensor Networks (WSN) have been expanded thanks to the advances in technology and the price reduction of electronic components, which allows production of low-cost and low-power sensor nodes. Moreover, due to their ubiquity, the application of WSN covers many fields such as industrial, transportation, military, medical, environmental, agriculture, and others [1–3]. For many of the WSN applications, for instance, agricultural or environmental monitoring, the on-site interaction with the sensor node is quite limited for obvious reasons, thus, the sensor nodes must be designed in a manner that power consumption is optimized to make

the sensor as autonomous as possible or even reach to a self-powered device [4].

In terms of hardware, several alternatives of low-power modules can be used to reduce power consumption: MEMS devices can be used for sensing; Zigbee, Bluetooth Low Energy (BLE), Low Power Wide Area (LPWA) for communications; low-power micro-controllers for processing and high-efficiency power management along with high capacity batteries for the power supply [4–6]. In addition, most of those component have inherited power-saving modes that may be used to reduce even more their power consumption. On the other hand, in terms of software, the efficient implementation of those power-saving modes would optimize their low-power capabilities. Moreover, if there is on-site data processing, the algorithms could be improved so that the controller requires lower resources to perform specific tasks.

For the case of noise pollution, there are several approaches of WSN developed, most of them based on low-cost hardware [7–10]. Although the low-power consumption requirement is always pointed out, there is a lack of specific strategies that help to achieve and evaluate the power consumption reduction in custom sensor nodes for acoustic measurements.

Thereby, the present paper proposes the hardware that may be used for a low-cost low-power acoustic sensor node (ASN) aimed to perform mobile noise measurements [11]. Then, to reduce the power consumption of the ASN's processing unit, two calculation methods of the one-third octave band spectrum (a task continuously executed), based on a Multi-rate Filter Bank and on the Power Spectral Density, are acoustically and electrically evaluated.

2. SENSOR NODE

A WSN is composed by many sensor nodes that are deployed throughout an area of interest. A sensor node consists mainly of the following subsystems [12]:

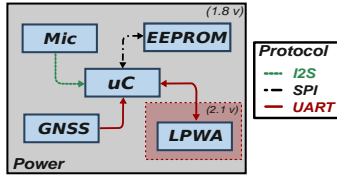


Figure 1: Main components of the ASN where two voltage domains are shown: 2.1 v for the LPWA and 1.8 v for the other modules. Moreover, the communication protocols between the uC and the other components are also shown.

- Controller/processing unit: Performs the data gathering, processing and tasks management.
- Sensing: Corresponds to the transducer(s) of physical signals to digital ones.
- Power supply/management: Provides the energy to the different subsystems of the sensor node.
- Communications: Transfers the gathered and pre-processed data. It is usually able to receive configuration commands of the sensor node as well.

2.1 Hardware design

For the case of acquiring mobile georeferenced noise measurements, the main components of the sensor are depicted in Figure 1, where the communication protocols between the modules and the processing unit, as well as their voltage supply, can also be observed. Thus, for the processing unit, the low-power microcontroller (uC) STM32L452RE was chosen. Moreover, the digital MEMS microphone SPH0645LM4H is selected for acquiring the acoustic signals. To perform the data georeferencing, the Global Navigation Satellite System (GNSS) MAX-M10S-00B is also included. Finally, to transmit the sampled data, the Low Power Wide Area (LPWA) SIMCOM SIM7022, which is complemented by the ultra-low power EEPROM module M95P32-IXMNT to temporary store samples when there is a lack of mobile network signal, are included as part of the communications unit. At the moment, the sensor node is powered by three AA batteries.

2.2 Processing unit tasks

The sampling, georeferencing and noise computation processes are based on [13], where a real-time operating system (FreeRTOS) keeps the tasks synchronized and concurrently executed to perform the georeferenced noise sampling. The major differences to the sensor proposed in [13] are the addition of wireless capabilities and the focus on low-power consumption so that the sensor node autonomy would be highly enhanced. Thus, the tasks and their

description are as follows:

- **Sampling:** Acquires acoustic data continuously from the microphone at a sampling frequency of 32 kHz.
- **Signal processing:** It is executed every 125 ms (4000 samples). It computes the a-weighted and the one-third octave band equivalent sound levels ($L_{Aeq, 125ms}$ and $L_{eq-fc, 125ms}$, respectively).
- **Georeferencing:** Computes the one second a-weighted and the one-third octave band equivalent sound levels, L_{Aeq} and L_{eq-fc} , respectively. Then, the coordinates are obtained from the GNSS and all information is appended together in a local buffer.
- **Data transmission:** Once the local buffer has five L_{Aeq} and L_{eq-fc} , after validating the network connection, it sends the data to the server (COAP protocol). In case that the mobile network is not available, a timeout is executed to try again after a given time. The timeout length is increased for each data transmission attempt in order to save energy.

2.3 Optimization

As mentioned before, another possibility to reduce the power consumption, specifically when a sensor node is continuously sampling/processing the measurements in real-time, is the optimization of the processing algorithms. Thus, to reduce the processing load in the signal processing task, which is executed continuously and with higher computation load, three algorithms will be evaluated for the calculation of the one-third octave band spectrum:

- Full filter bank (considered as the reference)
- Multi-rate filter bank (signal decimation)
- PSD

2.3.1. Full and multi-rate filter banks

Figure 2a shows a full filter bank for the calculation of the one-third octave spectrum, where one band-pass filter is employed. Moreover, Figure 2b shows a multi-rate filter bank, where a decimation filter is applied after three one-third octave bands to reduce the sampling frequency and, as a consequence, the number of samples to compute the one-third octave band spectrum. For the multi-rate filter, it is observed, based on the number of samples to be processed, that the computation should be reduced.

For the present comparison, to comply with Class 1 of IEC 61260-1:2014, the one-third octave filters are designed as 4th order, for central frequencies 8 and 10 kHz, and 3rd order, for central frequencies between 50 Hz and 6.3 kHz, Butterworth IIR pass-band filters, as recommended in literature [14].

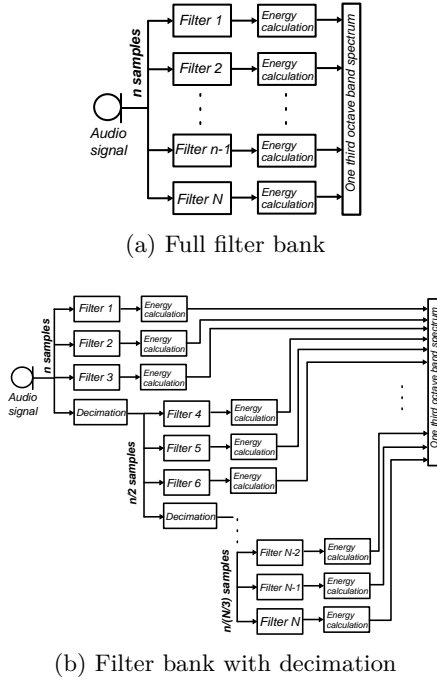


Figure 2: Computation of one-third octave band spectrum based on filter banks: (a) full filter bank and (b) multi-rate filter bank (signal decimation every three filters).

2.3.2. Power spectral density (PSD)

An alternative to compute the one-third octave band spectrum is using the PSD, which provides the magnitude of the spectrum of the signal normalized to a 1 Hz band. For a discrete signal, and not including the DC component and the Nyquist frequency, the PSD is defined as:

$$PSD(k) = \frac{2\Delta t |X(k)|^2}{N}, \quad 0 < k < N/2 \quad (1)$$

where $X(k)$ is the spectrum (FFT) of the input signal for the frequency bin k , N is the number of samples of the block and Δt is the sampling interval. For the optimal computation of the FFT, N is zero padded to reach 4096 samples (N_{zp}), thus:

$$k = \frac{F_s}{N_{zp}} = 7.8Hz. \quad (2)$$

Furthermore, to compute the one-third octave band spectrum, the $PSD(k)$ between the frequency band's lower (f_l) and upper (f_u) limits are summed and scaled to

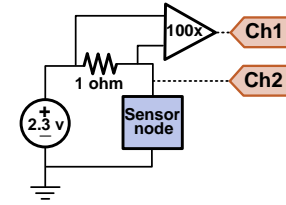


Figure 3: Schematic of current measurement based on a shunt resistor with a 100x voltage amplifier.

the current one-third octave band's bandwidth (Δf) as:

$$PSD_{f_c} = 10 \log_{10} \left\{ \left[\sum_{k \in [f_l, f_u]} PSD(k) \right] \Delta f \right\} \quad (3)$$

2.4 Methodology

Five ASNs are evaluated for both one-third octave band calculation algorithms (filter banks and PSD) in terms of the power consumption and acoustical performance. Since no wireless capabilities are required for the testing, the GNSS and LPWA modules are switched off. Also, no power-saving modes are implemented in the sensor node at this development stage.

2.4.1. Power consumption measurements

Figure 3 shows the schematic of the power consumption measurement of the ASN. A 1 ohm high precision shunt resistor, which is amplified 100 times by a high-performance operational amplifier in a differential configuration, is used to indirectly measure the current consumption using channel 1 of the Tektronix 2 series oscilloscope. Moreover, channel 2 is used to measure the input voltage simultaneously to compute the power consumption at each time t . Thus, based on the ohm's law, considering the 1 ohm resistance and the 100x voltage amplifier, the output of ch1 as a function of time can be converted to current as:

$$I(t) = \frac{V_{ch1}(t)}{100} \quad (4)$$

and the power consumption can be computed with:

$$P(t) = V_{ch2}(t) \times I(t) \quad (5)$$

for a measurement length of 2 seconds at a sampling frequency of 200 MHz of the oscilloscope.

Moreover, to contrast the power consumption between the three algorithms, the root mean square (RMS) was

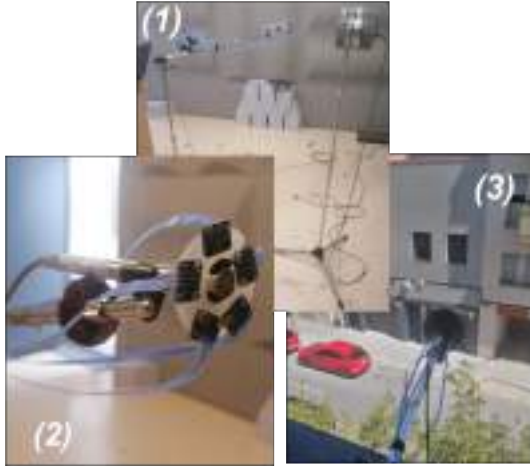


Figure 4: Acoustic testing set-up for laboratory tests and actual traffic noise measurements.

calculated for the whole period of measurement. Then, two comparisons are performed: one based on the actual power consumption (RMS) and the other using the power consumption normalized to the IDLE current (\overline{RMS}), that, from Equation 2.4.1 and the measured IDLE current (I_{idle}) is obtained as:

$$P_{norm}(t) = V_{Ch2}(t) \times [I(t) - I_{idle}] \quad (6)$$

2.4.2. Acoustic measurements

First, measurements are performed in a semi-anechoic chamber. A Beyma 5MP60N speaker with a frequency response from 50 to 12 kHz is placed at a height of 1.2 m in a tripod (Figure 4-1). Thereby, at an approximate distance of 20 cm, the 5 MEMS microphones of the sensor nodes, which are put around the microphone of a Type 1 Sound Level Meter (SLM) Cesva SC-310 using a plastic support in a pentagonal shape, are mounted in a tripod as well, with the microphone arrangement at the same height as the speaker (Figure 4-2). Then, three minutes of different sounds: white, pink and recorded noise traffic, are measured.

Second, 30 minutes of real traffic noise is measured at about six meters height through the opening of a window, as can be seen in Figure 4-3. A windshield was adapted to cover the microphone arrangement.

For the acoustic measurements, since one SLM is used as the reference, the tests are performed only for the optimized algorithms, i.e., the multi-rate filter bank and the

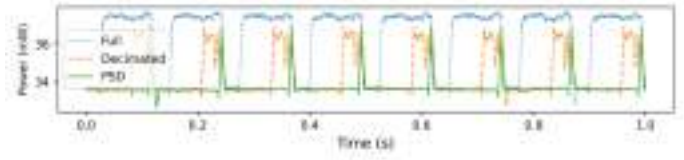


Figure 5: Comparison of the power consumption for the calculation of one-third octave band through full filter bank, multi-rate filter bank and PSD, for one ASN.

PSD. Thus, the one-third octave band noise level difference between the SLM and the average of the 5 ASNs is computed as:

$$\Delta L_{eq-fc} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 L_{eq-fc}^i - L_{eq-fc}^{SLM} \quad (7)$$

To observe the variability among different ANSs, the standard deviation σ_{fc} is also computed considering the individual differences between the sensor nodes and the SLM.

3. RESULTS

3.1 Power consumption

Figure 5 shows an example of one second of power consumption measurement for one ASN and for the three calculation algorithms. It can be seen that, compared to the full filter bank, there is a clear power consumption reduction obtained for the optimized algorithms. Moreover, if one compares the multi-rate versus the PSD, it is observed that even more power consumption reduction is achieved, mainly because the one-third octave computation takes a shorter time to be completed since only one FFT is required instead of the 23 filters. Moreover, for the energy calculation of each one-third octave band, since for the filter bank the energy is computed based on the RMS of the filtered signal, the PSD requires less computation as well, as can be interpreted from Equation 2.3.2.

Table 1 shows the comparison of the average value (5 ASNs) of the RMS and the normalized one, \overline{RMS} . The percentage of power consumption reduction compared to the full filter bank is shown in parenthesis. It is observed that a general drop is obtained compared to the full filter bank. Moreover, the \overline{RMS} shows the maximum power reduction that could be obtained using the implementation of the PSD, which is 88.4%. Since the proposed sensor node must be continuously taking acoustic samples, this maximum value could not be achieved in practice, but this

	Full bank [mW]	Multi-rate [mW]	PSD [mW]
\overline{RMS}	39.62	37,48 (5.4)	36,98 (6.7)
\overline{RMS}	3.07	0.97 (68.4)	0.36 (88.3)

Table 1: Power consumption comparison between the three algorithms for the computation of the one-third octave band spectrum. The RMS of the actual power consumption and the \overline{RMS} normalized to the IDLE current is shown. The percentage of power consumption reduction compared to the full filter bank is shown in parentheses.

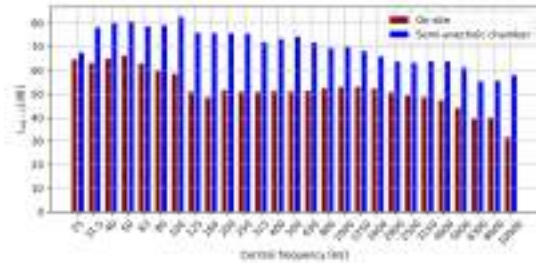


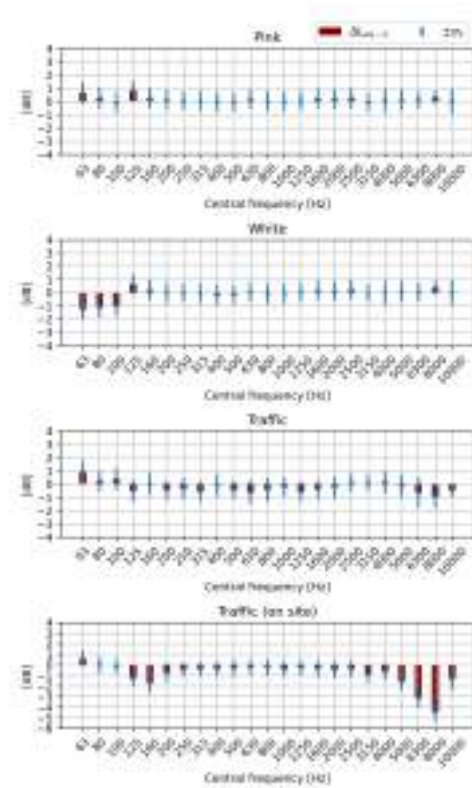
Figure 6: Comparison between the traffic noise measured on-site and in the semi-anechoic chamber.

result could be interpreted as the lower the IDLE current, the higher the contribution of the PSD algorithm to the energy saving.

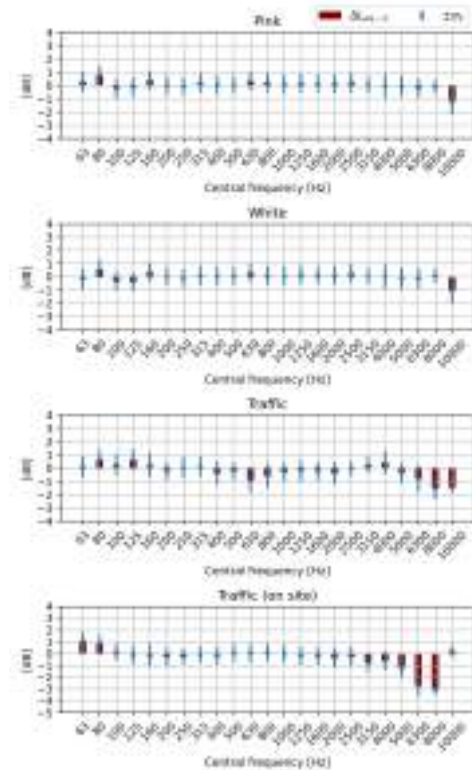
3.2 Acoustical tests

Sub-figures 7a and 7b show the ΔL_{eq-f_c} of the multi-rate filter bank and the PSD algorithms, respectively. It is observed that in almost all of the frequencies for both algorithms, σ_{f_c} is lower than 1 dB, which means that the microphone arrangement (position) has no great influence in the results. Moreover, for the measurements performed in the semi-anechoic chamber, almost all of the ΔL_{eq-f_c} fall below 1 dB, except the two lowest frequencies in the white noise test for multi-rate filter bank and the two highest frequencies in traffic noise test for the PSD based algorithm.

Finally, for the case of the real traffic noise measurement, it can be seen that there is an overestimation of levels from 5 kHz and higher. This phenomenon, as can be seen in Figure 6, is mainly produced by the combination of the low noise levels measured for high frequencies, which are below 42 dB and corresponds the estimated linearity noise floor of the microphone, that also explains why it did not happen when using the speaker.



(a) Multi-rate filter bank



(b) PSD

Figure 7: Difference and standard deviation between the average L_{eq-f_c} of the ASNs and the one of the SLM for (a) the decimated filter bank and (b) PSD algorithms.

4. DISCUSSION

For the computation of the one-third octave band spectrum based on the PSD, it is important to note that since the frequency bins are for a fixed bandwidth (see Subsection 2.3.2), two one-third octave bands could share a frequency bin in some percentage. Different approaches could help to compensate for this issue such as assigning only the percentage belonging to each one-third octave band, which is not likely to highly increase the required processing. Moreover, due to the fixed and logarithmic frequency bandwidths of the PSD and one-third octave band, respectively, higher amount of bins (k) will be used to compute the energy (Equation 2.3.2) for higher frequency bands, thus, some uncertainty could be expected in lower frequencies for the short number of bins.

Moreover, regarding the required attenuation in [15], a comparison similar to the one show in this paper is presented in [14], the one-third octave band spectrum calculation through FFT and filter banks is acoustically compared, but with the aim of analyzing noise emitted by electrical substations. It was found that for specific frequencies, 31.5 Hz and 5 kHz, the attenuation levels as required by the normative [15] were not met. Moreover, when analyzing noise emitted by the substation, differences higher than 6 dB can be found. For the specific case of traffic noise analyzed in this paper, differences up to 4 dB were obtained mainly in high frequencies, but they are clearly explained by the combination of the low noise level of the source and the high noise floor of the MEMS microphone. Moreover, in mobile monitoring, the one-third octave measurement is used as a support to identify conflict situations, so the error in these bands, which does not affect the global value, is not critical.

5. CONCLUSIONS

The present study showed that implementing efficient algorithms could help to reduce the power consumption of the sensor nodes. Moreover, it was observed that having a low IDLE current of the ASN, which could be done by selecting proper hardware and managing their low-power modes efficiently, is also vital for achieving a greater power consumption reduction in terms of percentage due to these processing optimizations. Also, as seen in the results, the processing reduction due to the implementation of the one-third octave band spectrum calculation based on the PSD is superior to the ones based on filter banks, whether they are full or multi-rate (decimated).

For the case of the acoustic comparison, it is observed that both of the algorithms perform well for measuring

common types of noises such as white, pink and traffic noise. The measured differences in the noise level of the ASNs compared to a Type 1 sound level meter fall most of the times below 1 dB. Moreover, although more tests are required to show it, a clear advantage of using the filter bank compared to PSD could not be observed in these preliminary tests.

REFERENCES

- [1] M. Majid, S. Habib, A. R. Javed, M. Rizwan, G. Srivastava, T. R. Gadekallu, J. C.-W. Lin, Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review, *Sensors* 22 (6) (2022) 2087. doi:10.3390/s22062087.
- [2] L. Hamami, B. Nassereddine, Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review, *Computers and Electronics in Agriculture* 179 (2020) 105782. doi:10.1016/j.compag.2020.105782.
- [3] P. C. Fiallos, J. R. Garbi, T. P. Gomez, LOW-COST DEVICE FOR FAULT DIAGNOSIS IN BEARINGS BASED ON THE HILBERT-HUANG TRANSFORM, *DYNA* 98 (5) (2023) 480–486. doi:10.6036/10875.
- [4] R. A. Kjellby, L. R. Cenkeramaddi, A. Frøylog, B. B. Lozano, J. Soumya, M. Bhang, Long-range & Self-powered IoT Devices for Agriculture & Aquaponics Based on Multi-hop Topology, in: 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2019, pp. 545–549. doi:10.1109/WF-IoT.2019.8767196.
- [5] D. Newell, M. Duffy, Review of Power Conversion and Energy Management for Low-Power, Low-Voltage Energy Harvesting Powered Wireless Sensors, *IEEE Transactions on Power Electronics* 34 (10) (2019) 9794–9805. doi:10.1109/TPEL.2019.2894465.
- [6] S. Du, Y. Jia, S. Member, C. Zhao, A Nail-Size Piezoelectric Energy Harvesting System Integrating a MEMS Transducer and a CMOS SSHI Circuit 20 (1) (2020) 277–285, publisher: IEEE.
- [7] P. W. Wessels, T. G. Basten, Design aspects of acoustic sensor networks for environmental noise monitoring, *Applied Acoustics* 110 (2016) 227–234, publisher: Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.apacoust.2016.03.029.
- [8] R. M. Alsina-Pagès, U. Hernandez-Jayo, F. Alías, I. Angulo, Design of a mobile low-cost sensor network using urban buses for real-time ubiquitous noise

- monitoring, *Sensors (Switzerland)* 17 (1) (2017) 1–21. doi:10.3390/s17010057.
- [9] C. Mydlarz, M. Sharma, Y. Lockerman, B. Steers, C. Silva, J. P. Bello, The Life of a New York City Noise Sensor Network, *Sensors* 19 (6) (2019) 1415, number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/s19061415.
- [10] J. Picaut, A. Can, N. Fortin, J. Ardouin, M. Lagrange, Low-Cost Sensors for Urban Noise Monitoring Networks—A Literature Review, *Sensors* 20 (8) (2020) 2256. doi:10.3390/s20082256.
- [11] G. Quintero, A. Balastegui, J. Romeu, Traffic noise assessment based on mobile measurements, *Environmental Impact Assessment Review* 86 (2021). doi:10.1016/j.eiar.2020.106488.
- [12] K. Gulati, R. S. Kumar Boddu, D. Kapila, S. L. Bangare, N. Chandnani, G. Saravanan, A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT), *Materials Today: Proceedings* 51 (2022) 161–165. doi:10.1016/j.matpr.2021.05.067.
- [13] G. Quintero, A. Balastegui, J. Romeu, A low-cost noise measurement device for noise mapping based on mobile sampling, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 148 (2019) 106894. doi:10.1016/j.measurement.2019.106894.
- [14] Z. Liao, Z. Gan, J. Hu, J. Zhao, B. Zhou, J. Zhang, Comparative study of two typical one-third octave algorithms in substation noise analysis, *Energy Reports* 8 (2022) 319–326. doi:10.1016/j.egypr.2022.10.156.
- [15] IEC 61260-1:2014 | IEC.
URL <https://webstore.iec.ch/publication/5063>



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

ENA-0 Enseñanza en acústica.

EXPERIENCIA DE FABRICACIÓN, MONTAJE, PUESTA EN MARCHA Y UTILIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE LABORATORIO ACORDE A LA NORMA UNE-EN ISO 16251-1.

*David Caballol*¹
María de los Angeles Navacerrada²
*Daniel de la Prida*³
*Antonio Pedrero*²

^{1 y 2}Grupo de Investigación en Acústica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid.

³ Universidad Carlos III de Madrid

RESUMEN

El presente trabajo describe el proceso aprendizaje llevado a cabo por varios alumnos de Grado y Máster, mediante la fabricación, montaje, puesta en marcha y utilización de una instalación de laboratorio para la medición en laboratorio de la reducción de la transmisión del ruido de impactos por revestimientos de suelo acorde a la norma UNE-EN ISO 16251-1.

La norma describe con precisión la instalación a fabricar y aparentemente todo parece muy sencillo.

Sin embargo, factores como el peso final de la instalación, su transporte, la retracción del hormigón armado empleado en su construcción, el método de fijación de los acelerómetros, la planeidad del hormigón empleado, y la posible reutilización de la losa flotante sobre los materiales ensayados condicionan el diseño y la ejecución del proyecto.

Una vez construido, se verificó su fiabilidad realizando ensayos a cuatro materiales específicos para reducir el ruido de impactos cuya mejora del aislamiento a ruido de impactos ya había sido cuantificada en estudios anteriores mediante las normas UNE-EN ISO 10140.

En la actualidad, varios alumnos se están llevando a cabo ensayos con materiales no específicos y se presentan los primeros resultados obtenidos.

ABSTRACT

This work describes the learning process of manufacturing, assembling, commissioning and using a laboratory installation for the laboratory measurement of the reduction

of impact sound transmission by floor coverings, according to the UNE-EN ISO 16251-1 standard, carried out by several undergraduate and master students.

The standard is very precise in its description of the installation to be built, and at first glance everything is very simple.

However, factors such as the final weight of the installation, its transportation, the shrinkage of the reinforced concrete used to build it, the method of fixing the accelerometers, the flatness of the concrete used and the possible reuse of the floating slab on the tested materials determine the design and execution of the project.

Once built, its reliability was verified by testing four specific materials to reduce impact noise. The improvement in impact noise insulation had already been quantified in previous studies using the UNE-EN ISO 10140 standard.

At present, several students are working on testing non-specific materials and the first results obtained are presented.

Palabras Clave— Experiencia docente, Ruido de impactos, Ensayos en laboratorio, Vibraciones.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid se cuenta con un laboratorio de materiales de construcción bastante completo, que permite a alumnos y profesores hacer numerosos tipos de ensayos mecánicos (compresión, tracción, flexión, arrancamiento, deslizamiento, etc.) y térmicos.

¹ *Autor de contacto:* david.caballol@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Sin embargo, en la misma Escuela no se cuenta con apenas instalaciones que permitan realizar medidas acústicas en laboratorio. Al ser una Escuela tradicionalmente dedicada a la Ejecución de Obra de Edificación, los equipos y enseñanzas que se imparten, han estado tradicionalmente más enfocadas a las mediciones acústicas in-situ.

Actualmente reguladas según las directrices de las distintas partes de las normas ISO 16283 [1] y anteriormente según la serie de normas ISO 140. [2]

Sin embargo, la implantación de diversos estudios de Máster está obligando a la Escuela a adaptarse y a disponer de unas instalaciones mínimas que permitan a los alumnos disponer de montajes de laboratorio en los que poder ensayar las características acústicas de diferentes materiales y sistemas constructivos. Con el objetivo principal de poder llevar a cabo los procesos experimentales necesarios para sus trabajos fin de Máster sin que los alumnos tengan que desplazarse a otras Escuelas.

Con esta idea en mente, se comenzó a diseñar la fabricación de una instalación de laboratorio para la medición de la reducción de la transmisión del ruido de impactos por revestimientos de suelo acorde a la norma UNE-EN ISO 16251-1 [3].

Fue elegida esta norma porque describe unos equipos y procedimiento de ensayo, razonablemente asequibles, que no son complejos y que no necesitan de mucho espacio para ubicarse.

Durante el proceso de planificación, organización y diseño de la instalación, se propuso aprovechar la construcción y puesta en marcha de la nueva instalación, para llevar a cabo experiencias docentes, que se basan en el marco teórico del “learning by doing” [4].

Son conocidas las experiencias docentes existentes en el montaje y puesta en marcha de laboratorios de simulación [5, 6] y la existencia de muy variadas experiencias con laboratorios virtuales de varios tipos [7,8]. Sin embargo, es menos común encontrar referencias a experiencias docentes que impliquen el aprovechamiento docente de la construcción y la puesta en marcha de instalaciones físicas de laboratorio. [9, 10,11]

Ninguna de las experiencias docentes anteriormente descritas se refiere a una instalación acústica de laboratorio, ni aprovecha la experiencia de su construcción como una experiencia docente en sí misma. En todo ello consiste la novedad de nuestra experiencia.

2. DISEÑO EDUCATIVO Y EJECUCIÓN

2.1. Diseño

La construcción de la instalación, su puesta en marcha y la comprobación experimental de su fiabilidad era evidentemente una tarea que no debía ser llevada a cabo por un único alumno, aunque contase con apoyo docente. Los

conocimientos previos, la dedicación que el trabajo requería y su planificación temporal, excedía al tiempo normalmente dedicado a la realización de un trabajo de finalización de estudios de Grado o de fin de Máster.

Por este motivo, se decidió dividir el trabajo en dos partes y repartir el trabajo entre dos alumnas interesadas, una cursando estudios de Grado y otra de Máster. De este modo, era posible adaptar la parte de trabajo de cada una de ellas a los conocimientos previos que poseían.

La primera de ellas (alumna G), era una becaria del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control y estaba cursando cuarto curso de la titulación de Grado en Edificación en la UPM.

Las becas de colaboración en los Departamentos universitarios son unas becas cuyo objeto específica que han de promover la iniciación en tareas de investigación de los estudiantes universitarios, por lo que este trabajo cuadraba perfectamente con el objeto de la convocatoria.

Las asignaturas superadas por la alumna G en sus estudios la presuponian una serie de capacidades constructivas y de conocimiento de los materiales de construcción.

La segunda alumna (alumna M), titulada en Ingeniería de Técnicas y Sistemas de Telecomunicación, estaba cursando estudios de especialización en el Máster en Ingeniería Acústica en la misma Universidad y tenía pendiente la realización de su trabajo fin de Máster.

El Trabajo Fin de Máster (15 ECTS) consiste en un proyecto de ingeniería acústica que la alumna ha de demostrar su capacidad para diseñar e implementar soluciones, por lo que este trabajo también cuadraba perfectamente.

El trabajo total se dividió en dos partes bien diferenciadas. La alumna G se encargaría de la construcción de la instalación y la alumna M de su validación y puesta en marcha.

Según el cronograma previsto, la alumna M iniciaba su tarea cuando la alumna G finalizaba la suya, por lo que inicialmente se plantearon los trabajos como independientes. Sin embargo, parte del trabajo hubo de ser llevado a cabo de modo colaborativo entre ambas, a causa del tipo de materiales a ensayar en el momento de verificar la instalación. Este hecho fortuito, enriqueció aún más la experiencia de aprendizaje.

Antes de iniciar su trabajo, se les enseñó cómo obtener a través de la biblioteca de la Universidad una copia de la norma UNE-EN ISO 16251-1 [3]. Como se pretendía fomentar su autonomía, se le explicó a cada una de ellas que, en el desarrollo de su parte del trabajo, tenían libertad para tomar las decisiones que considerasen necesarias (con nuestra supervisión) y que los docentes intentaríamos intervenir lo menos posible, sin su requerimiento previo.

2.2. Construcción

El diseño de la instalación (ver figura 1), estaba perfectamente definido en el anexo A de la norma UNE-EN ISO 16251-1 [3], por lo que la alumna G tan solo tuvo que interpretar los datos incluidos en la norma y planificar su realización.

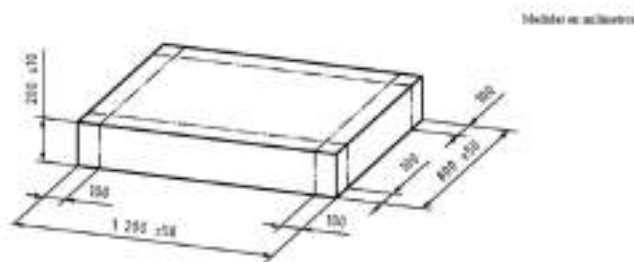


Figura 1. Dimensiones de la instalación descritas en el anexo A de la norma UNE-EN ISO 16251-1.

- Paso 1: Enseguida se advirtió que, para llevar a cabo la losa de hormigón, era necesario contar con una serie de materiales de construcción (arena, agua, grava, cemento, acero corrugado), muy concretos y en cantidades determinadas. Por lo tanto, uno de los primeros trabajos a llevar a cabo consistió en el estudio y el cálculo de las proporciones y las cantidades concretas de cada uno de los materiales de construcción necesarios.

Nos los hizo llegar a los docentes y nos encargamos de conseguirlos.

- Paso 2: Para construir la losa de hormigón era necesario construir primero un encofrado (un molde) que pudiera ser fabricado por una alumna con relativa facilidad. Se le propuso que el encofrado fuese realizado en madera. Por lo tanto, el segundo trabajo consistió en el cálculo del encofrado para soportar la presión hidrostática del hormigón. La alumna definió las secciones de secciones de madera mínimas necesarias y diseñó los anclajes. Los profesores la hicimos llegar los tableros, las tablas de madera y los anclajes y tornillería necesarios.

- Paso 3: La alumna G se puso manos a la obra y construyó el encofrado en el interior de uno de los espacios disponibles en el laboratorio de Materiales de Construcción.

- Paso 4: Se procedió al armado con acero corrugado y al amasado y vertido en el encofrado, del hormigón mediante hormigonera manual. Para llevar a cabo este proceso, se contó con la ayuda del Técnico de Laboratorio asignado al Laboratorio de Materiales.

El acero dispuesto fue del tipo B500SD mediante doble malla de diámetro 10 mm.

El hormigón vertido fue del tipo HA25B20X0

El aceite de desencofrado SIKA D 25L

- Paso 5: Para el proceso de curado de la losa de hormigón armado se empleó un pulverizador de agua durante el tiempo de endurecimiento.

- Paso 6: Durante el tiempo de fraguado y endurecimiento de la losa se construyeron las patas. Empleando como encofrado dos probetas cúbicas de hormigón, una sobre otra. Para conectarlas entre ellas se introdujeron en su interior 4 pequeñas varillas de acero corrugado. Se hormigonaron 5 patas, con la idea de quedarse con las 4 que mejor quedaran tras el desmoldado.

- Paso 7: Se desencofró la losa, se desmoldaron las patas y se cortaron los neoprenos de apoyo al tamaño especificado en la norma. Los neoprenos actúan como suspensión elástica y son necesarios para desvincular estructuralmente la placa de su entorno.

Una vez construida la losa y las patas se planteó un problema con su ubicación. En el lugar en el que se construyó no era posible dejarla, por lo que se tuvo que recurrir al empleo de una grúa manual y a la ayuda de parte del personal de administración y servicios de la escuela para desplazarla a su ubicación definitiva en el interior del Aula Museo de Construcción.

- Paso 8: Una vez ubicada en su posición definitiva, se colocaron 5 tornillos para los acelerómetros (uno más de los necesarios) en las posiciones previstas en la norma. Empleando resina epoxídica para su anclaje definitivo al hormigón.

En la figura 2 se puede apreciar el resultado final. La alumna G participó activamente en todas las fases, dirigiendo el trabajo en algunas de ellas, trabajando autónomamente en otras y colaborando en otras.



Figura 2. Placa de hormigón según UNE-EN ISO 16251-1

2.3. Verificación

La Alumna M se encargará de ensayar una serie de revestimientos que tienen un valor de ΔL conocido según ensayo en dos recintos acorde a las normas UNE-EN ISO 10140 [12] y compararlos con los resultados obtenidos al realizar los ensayos con la placa de hormigón suspendida elásticamente según UNE-EN ISO 16251-1 [3].

Los materiales ensayados fueron cedidos por dos escuelas de la Universidad Politécnica de Madrid y por la empresa Soprema.

En concreto los materiales ensayados fueron:

- Material 1: Paneles rígidos de caucho de 3 cm de espesor.
- Material 2: Panel rígido de lana de roca de 2 cm; Rockwool Rocksol 501
- Material 3: Lámina de polietileno expandido no reticulado de celda cerrada de 5 mm de espesor; Soprema Texsilen.
- Material 4: Lámina de fieltro no tejido de poliéster de alta tenacidad unido a protección bituminosa de 3,4 mm de espesor; Soprema Texfon.

Al revisar los resultados de los ensayos realizados con las normas UNE-EN ISO 10140 [12], se advirtió que los materiales 2, 3 y 4 habían sido ensayados empleando una losa flotante de 5 cm de espesor sobre ellos. Por lo que para poder comparar los resultados era imprescindible realizar los ensayos con las mismas condiciones.

Se propuso realizar una losa flotante que pudiera reutilizarse para futuros ensayos.

Para llevar a cabo la construcción de la losa flotante, era necesaria la construcción de otro encofrado. Las alumnas M y G, trabajaron juntas en el diseño y construcción del segundo encofrado (ver figura 3), así como en el vertido del mortero en el mismo.

Se extendió previamente una lámina plástica de polietileno para evitar que el mortero se adhiriera al hormigón. En el interior del encofrado se vertió un mortero de dosificación 1:4, armado en su interior con una malla de acero ligera. El vertido, se realizó con hormigonera manual.

Tras los preceptivos 28 días de endurecimiento, se procedió al levantamiento de la losa flotante, a la colocación del material y a la realización de los ensayos.



Figura 3. Encofrado para losa flotante.

Los ensayos se realizaron mediante acelerómetro modelo 4384 de Brüel & Kjær, analizador de frecuencia en tiempo real modelo 2144 de Brüel & Kjær, calibrador de acelerómetros modelo 4294 de Brüel & Kjær y máquina estandarizada de impactos modelo MI006 de CESVA.



Figura 4. Proceso de ensayo sin revestimiento.

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran cuatro gráficas en las que se exponen para cada uno de los materiales, los resultados de los ensayos realizados mediante la norma 16251-1, sus límites de incertidumbre calculados según UNE-EN ISO 12999-1 [13] y los datos de los ensayos de los mismos materiales proporcionados por el fabricante según la norma UNE-EN ISO 10140 [12].

Material 1: Caucho 3 cm espesor. Sin losa flotante. (Figura 5)

Los resultados muestran una alta concordancia entre los resultados comparados, con una diferencia máxima de 4,9 dB a 800 Hz y mínima de 0 dB a 5000 HZ.

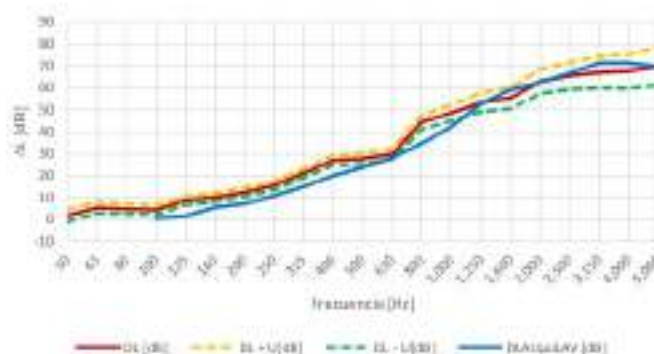


Figura 5. Resultados obtenidos con caucho 3 cm.

Material 2: Rockwool Rocksol 501 2 cm. Con losa flotante. (Figura 6)

Los resultados también muestran una alta concordancia entre los resultados comparados, con una diferencia máxima de 5,3 dB a 3150 Hz y mínima de 0,2 dB a 500 Hz.

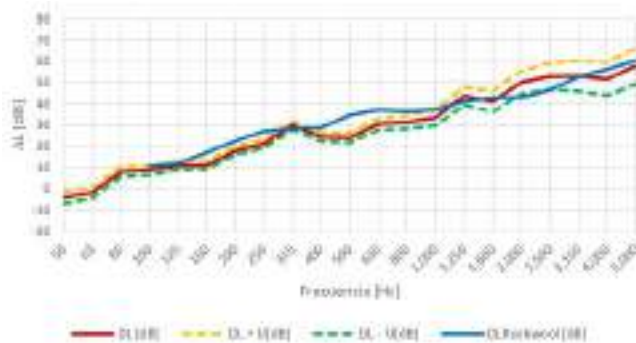


Figura 6. Resultados obtenidos con lana de roca 2 cm.

Material 3: Soprema Texsilen 5 mm. Con losa flotante. (Figura 7)

En este caso se observa una discrepancia mayor entre ambos resultados. Existe mayor concordancia en las bandas inferiores a 160 Hz y en la banda de 500 Hz, pero aparecen desviaciones notables en las altas frecuencias. La desviación máxima es de 11,6 dB a 2000 Hz y la mínima de 0 dB a 160 HZ.

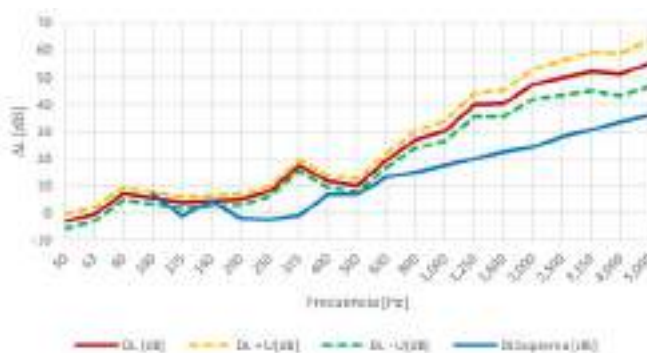


Figura 7. Resultados obtenidos con polietileno expandido no reticulado 5 mm.

Material 4: Soprema Texfon 3,4 mm. Con losa flotante. (Figura 8)

De nuevo hay similitud entre los resultados comparados, encontrándose la mayor desviación en la banda de 315 Hz (6,4 dB) y la menor en la banda de 5000 Hz (0,6 dB).

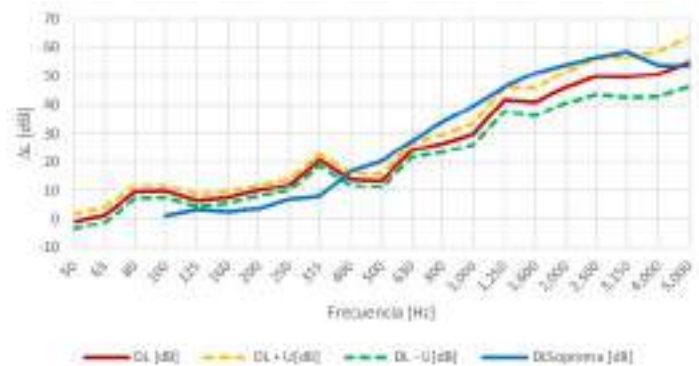


Figura 8. Resultados obtenidos con fieltro no tejido de poliéster con lámina biruminosa 3,4 mm.

Se considera que, en general, no existe una discrepancia significativa entre los resultados conseguidos por medio del método que sugiere la norma 16251-1 [3] y los ensayados por el fabricante empleando el método de los dos recintos según norma 10140 [12]. Tampoco se aprecia un sesgo evidente en función de la frecuencia entre las medidas comparadas.

4. CONCLUSIONES

La experiencia ha resultado muy satisfactoria para todas las partes implicadas. Tanto la alumna G como la M aprovecharon la experiencia de aprendizaje descrita, en la que pudieron proyectar en la realidad lo que habían aprendido teóricamente.

Fueron capaces de suponer, reflexionar y de tomar decisiones, (no siempre acertadas) y aprender de ellas. En el proceso, los profesores insistimos en su acompañamiento y en desechar el paradigma de que equivocarse es negativo. Este método “learning by doing” es especialmente adecuado para ello ya que reconoce que la experiencia se obtiene a través del proceso prueba-error, lo que fortalece el sentido del aprendizaje significativo a largo plazo.

La motivación de las alumnas fue muy alta en todo momento ya que no lo vieron como un “trabajo obligatorio” sino como un proyecto que se concentra en la aplicación práctica de sus conocimientos y que será capaz de generar un producto final que será beneficioso para el resto de la comunidad universitaria. El producto final es resultado de sus capacidades propias y colaborativas, reconociendo en sí mismo competencias y cualidades prácticas que podrán aplicar en el futuro (y obtener a la vez una excelente calificación en su trabajo Fin de Master).

Para la Escuela la experiencia también ha resultado muy satisfactoria. El proceso de construcción de la placa ha sido

relativamente abarcable y económico, por lo que este método nos ha aportado un medio de trabajo adecuado para laboratorios acústicos de ingresos modestos. Los materiales de construcción de la placa y de la losa flotante no necesitan mantenimiento y se degradan muy lentamente, por lo que se prevé que el sistema se pueda utilizar por alumnos y profesores durante un largo periodo de tiempo. Este procedimiento permite cuantificar la mejora del aislamiento a ruido de impactos con un menor coste económico y espacial que otros. Las mediciones se pueden realizar con rapidez y precisión y los cálculos a realizar no son complejos para el alumnado.

En la actualidad, varios alumnos se están llevando a cabo ensayos con materiales muy distintos y están realizando sus trabajos fin de Master aprovechando la instalación.

5. REFERENCIAS

- [1] UNE EN ISO 16283-2: 2021. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos. (ISO 16283-2:2020).. UNE. C/ Génova 6. Madrid.
- [2] UNE EN ISO 140-7: 1999 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 7: Medición in situ del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos. (ISO 140-7:1998). UNE. C/ Génova 6. Madrid.
- [3] UNE EN ISO 16251-1:2015 Acústica. Medición en laboratorio de la reducción de la transmisión del ruido de impacto por revestimientos de suelo sobre un suelo de pequeñas dimensiones. Parte 1: Suelos pesados. (ISO 16251-1:2014).). UNE. C/ Génova 6. Madrid.
- [4] Ruiz, G. (2013). La teoría de la experiencia de John Dewey: significación histórica y vigencia en el debate teórico contemporáneo. *Foro de Educación*, 11(15), pp. 103-124. doi: <http://dx.doi.org/10.14516/fde.2013.011.015.005>
- [5] Mekic, E., Djokic, I., Zejnelagic, S., & Matovic, A. (2016). Constructive approach in teaching of voip in line with good laboratory and manufacturing practice. *Computer Applications in Engineering Education*, 24(2), 277-287.
- [6] Bunse, C., Kennes, L., & Kuhr, J. C. (2022, May). On using distance labs for engineering education. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Software Engineering Education for the Next Generation* (pp. 5-11).
- [7] Dede, D., Abdullah, A. G., Mulyanti, B., & Rohendi, D. (2019). Review TVET learning innovation: Augmented reality technology for virtual 3D laboratory. In A. G. Abdullah, A. B. D. Nandiyanto, I. Widiaty, A. A. Danuwijaya, & C. U. Abdullah (Eds.), *4Th anual Applied Science and Engineering Conference*, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/7/077062>
- [8] Reisoglu, I., Topu, B., Yilmaz, R. M., Yilmaz, T. K., & Goktas, Y. (2017). 3D virtual learning environments in education: a meta-review. *Asia Pacific Education Review*, 18(1), 81–100. <https://doi.org/10.1007/s12564-016-9467-0>.
- [9] Magnusson, J and Rolf, K and Svedelius, G A. “Building Pedagogical Horticultural Facilities for Improved Learning in Horticultural Education” in *Proc. of the V International Symposium on Horticultural Research, Training and Extension*, (Chiang Mai, Thailand), pp. 137–145, 2009.
- [10] Qing, Guo and Chunliang, Zhang and Yijun, Wang and Fan, Jiang, “Exploration on the Engineering Laboratory Construction and Design based on the CDIO education mode,” in *Proc. of the 7Th International Conference on Computer Science & Education*, Vols I-VI, (Melbourne, Australia), pp. 1983–1986, 2012.
- [11] Chen, Can and Chu, Lian-D. and Peng, Wen-L., “Planning and Construction of an Industrial Engineering Integrated Laboratory,” in *Proc. of the Third International Conference on Education and Sports Education*, (Macau, China), Vol II pp. 380–384, 2012.
- [12] UNE EN ISO 10140-3: 2022. Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 3: Medición del aislamiento acústico al ruido de impactos. (ISO 10140-3:2021) . UNE. C/ Génova 6. Madrid.
- [13] UNE EN ISO 1299-1: 2021. Acústica. Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios. Parte 1: Aislamiento acústico. (ISO 12999-1:2020).. UNE. C/ Génova 6. Madrid.

LA NECESIDAD DE GENERAR CAMPAÑAS DE INFORMACIÓN Y HERRAMIENTAS PARA NIÑOS DE EDUCACIÓN BÁSICA EN LA CIUDAD DE MÉXICO RESPECTO AL RUIDO AMBIENTAL Y SUS EFECTOS

Elisa Garay Vargas^{1*}
Laura Angélica Lancón Rivera¹
Dulce Rosario Ponce Patrón¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, Ciudad de México, México

RESUMEN

Desde el año 2016, se ha trabajado en la generación de campañas para sensibilizar a niños de educación básica respecto al ruido ambiental y sus efectos.

El trabajo realizado, mediante la aplicación de encuestas y entrevistas a docentes y estudiantes, ha demostrado que existe conocimiento básico de los efectos que el ruido tiene en la salud, sin embargo, se ha identificado un déficit en la información y en las herramientas didácticas enfocadas en que estudiantes y docentes puedan mejorar su entorno sonoro de forma cotidiana dentro del aula.

Este trabajo, muestra el resultado de las encuestas y entrevistas realizadas en las campañas entre los años 2016 a 2023, y se presenta una propuesta metodológica para mejorar las condiciones sonoras en el aula, integrando la participación de docentes y estudiantes.

ABSTRACT

Since 2016, campaigns have been created to sensitize elementary school-aged children about environmental noise and its effects.

Through the application of surveys and interviews with teachers and students, the investigation has shown that there is a basic knowledge of the noise effects on health. An information deficit has been identified, as well as a lack of didactic tools focused on how students and teachers can improve their sound environment on a daily basis within the classroom.

This work shows the results of the surveys and interviews carried out in campaigns between 2016 and 2023. It establishes a methodological proposal to improve the sound conditions in the classroom, integrating the participation of teachers and students.

Palabras Clave— ruido ambiental, concienciación, sensibilización

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta el trabajo realizado por el Área de Investigación de Análisis y Diseño Acústico de la Universidad Autónoma Unidad Azcapotzalco, con la finalidad de dar a conocer los resultados de encuestas, entrevistas y campañas llevadas a cabo para informar a la comunidad sobre los efectos del ruido en la salud.

Se inicia describiendo el problema del ruido ambiental, sus efectos en la salud y su impacto en los centros educativos. Además, se realiza una síntesis de los autores más representativos que han contribuido a los fundamentos en este tema.

Posteriormente, se aborda el panorama general del ruido ambiental en la Ciudad de México, considerando estudios realizados con relación al tema, normatividad vigente, campañas e información gubernamental e información disponible en las escuelas.

Seguidamente, se hace una síntesis de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de encuestas y realización de campañas de sensibilización en diversos centros educativos de la Ciudad de México.

Más adelante, se propone una metodología para mejorar las condiciones sonoras en el aula y entorno.

Finalmente, se realiza la discusión y conclusiones derivadas de este trabajo.

2. EL PROBLEMA DE RUIDO EN LAS AULAS

El crecimiento y la urbanización acelerada de las ciudades, ha traído consigo la incorporación de nuevos sonidos en el entorno urbano, formando así parte del paisaje urbano en el

* **Autor de contacto:** egy@azc.uam.mx

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

que se vive. Esta acumulación de sonidos de toda índole en el ambiente urbano genera efectos perjudiciales para la salud, lo que ha llevado a considerar al ruido como un problema de contaminación. Según Stewart [1], el ruido ambiental es el contaminante que más molesta a los individuos en su vida cotidiana y de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud [2], la exposición al ruido conlleva una carga de morbilidad que representa más de un millón de años saludables de vida perdidos anualmente en Europa occidental. Esto incluye enfermedades fisiológicas, psicológicas y molestias en general.

Berglund y Lindvall [3] desarrollaron un marco general de referencia sobre los aspectos del ruido en comunidad para la Organización Mundial de la Salud, con el objetivo de ampliar el documento “Noise” de 1980. En su propuesta, añadieron nuevas secciones en el ámbito de estudio de la psico-acústica y los efectos mentales y psicológicos del ruido, los cuales no habían sido abordados a profundidad en la década de los ochenta. Asimismo, integraron una propuesta de pautas para los niveles de ruido en diferentes entornos.

Desde de finales del siglo XX y durante el siglo XXI varios autores, como Hetu et al. [4], Evans et al. [5], Shield y Dockrell [6], Klatt et al. [7], Astolfi [8], Brännströmm, et al. [9], Servilha, et al. [10], Lim, et al. [11], Rudner, et al. [12], entre otros, han llevado a cabo investigaciones para comprender los efectos del ruido en niños de diferentes edades y niveles escolares. Se ha demostrado que la presencia de ruido en el entorno escolar y principalmente dentro del aula genera diversos efectos, destacando el déficit de atención visual y sostenida, la baja discriminación auditiva y la percepción del habla, la memoria menos eficiente para realizar tareas complejas, un desempeño menos efectivo en la lectura y un bajo rendimiento académico.

Actualmente, las investigaciones apuntan a que los efectos del ruido en la salud no sólo se deben al ruido propio de las actividades en las ciudades, sino también a actividades recreativas. La Organización Mundial de la Salud reporta que más de mil millones de jóvenes adultos tendrán problemas de audición debido a prácticas poco seguras, como la exposición al ruido recreativo [13].

3. EL PANORAMA EN MÉXICO

3.1. Estudios realizados

En México, se han realizado diversos estudios sobre los efectos del ruido ambiental en el entorno escolar. Por ejemplo, las investigaciones realizadas por Campuzano M. E., et al. [14] y Estrada C. y Méndez I. [15], han analizado cómo el ruido urbano, principalmente el causado por el tránsito vehicular, afecta el desempeño de los estudiantes en el aula. En esta misma línea, existen numerosas referencias de otros estudios de centros educativos en diferentes localidades, que respaldan lo expuesto por los primeros autores.

Además, se ha explorado el impacto del ruido recreativo, como lo evidencia la investigación llevada a cabo por el Instituto de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra en la Ciudad de México [16]. Este estudio reveló que el 20.8% de una muestra de 480 estudiantes de primaria, secundaria y preparatoria en la Ciudad de México sufrió daño auditivo inducido por ruido recreativo. Es importante destacar que los resultados de este estudio superan las cifras reportadas en la literatura y se hace hincapié en la necesidad prioritaria de generar campañas de sensibilización para prevenir la pérdida auditiva.

Orozco M. y González A. [17] también mencionan que existe un cambio sociocultural hoy en día, donde el uso temprano de recursos tecnológicos ha llevado a que los jóvenes prefieran el ritmo sobre la melodía, mostrándose atraídos por el sonido a alto volumen en lugar de la calidad del sonido.

Por otro lado, Rodríguez P. [18] utiliza el término de Violencia Acústica, descrito por Lago Castro en 2003 [19], y explica cómo el ambiente en donde se desenvuelven los más jóvenes es determinante para el desarrollo de sus características psicológicas y sociales. Destaca que la violencia acústica, a pesar de ser un problema que aqueja a la sociedad, es uno de los menos estudiados a pesar del gran impacto que tiene en la infancia al presentarse de forma desmedida y que a largo plazo desencadena problemas de salud pública.

3.2. Normatividad

A nivel internacional, existen distintas normas que establecen los límites máximos de ruido de fondo permitidos en las aulas escolares. Mientras que algunos países fijan un límite máximo de 40 dB, en otros, se establecen valores de entre 30 dB a 35 dB.

En el caso de México, la Secretaría de Educación Pública (SEP) ha definido los límites máximos de ruido ambiental en las “Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones de Infraestructura Educativa” [20]. Se establece que el límite máximo de ruido fondo permitido es de 35 dB, siempre y cuando el edificio se encuentre en una zona urbana, junto a vialidades en donde el ruido sea generado por el tráfico vehicular. En zonas rurales, se establece un criterio de 30 dB.

Es importante señalar que, por lo general estos valores no se cumplen debido a dos razones principales. Por un lado, la ubicación de las escuelas queda inmersa dentro de la ciudad y en la mayoría de los casos rodeada por vialidades con mucho flujo vehicular. Por otro lado, la planificación y diseño de los edificios escolares y sus actividades no suelen tener en cuenta consideraciones acústicas.

3.3. Campañas e información gubernamental

En la Ciudad de México, opera la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) [21], cuya función principal es salvaguardar los derechos de los residentes de la ciudad. Su misión consiste en crear entornos propicios para el desarrollo de la población, garantizando la salud y el bienestar de sus habitantes. Este organismo tiene la facultad de vigilar y promover el cumplimiento de disposiciones jurídicas en materia ambiental.

En materia de ruido, la PAOT es la entidad encargada de recibir las quejas de los habitantes y ha publicado información oficial para la ciudadanía sobre el ruido ambiental [22]. Además, ha difundido un programa llamado "Ya bájale. El ruido contamina y afecta tu salud", cuya finalidad es informar a la población sobre los efectos perjudiciales del ruido en la salud y proporcionar orientación sobre cómo reducir el ruido en sus comunidades [23].

Si bien, estas contribuciones han obtenido resultados positivos en la participación de una pequeña fracción de la población en la Ciudad de México, requieren una difusión más intensa por parte de medios de comunicación, así como el respaldo de instituciones públicas, como la Secretaría de Educación Pública, para llevar a cabo campañas educativas más prolongadas dentro de las escuelas. Esto ayudaría a que los niños adquieran conocimientos sobre el ruido y sus efectos desde edades tempranas. También el núcleo familiar es un aspecto importante para establecer una educación sonora desde la niñez.

3.4. Información en las escuelas

En una revisión de los libros de texto gratuito utilizados desde primero hasta sexto grado para el vigente ciclo escolar [24], se identificaron ocho temas que abordan conceptos básicos del sonido, como la intensidad, la duración, el tono, entre otros, además de contenido relacionado con la audición. En cada temática, se realizan actividades para ejemplificar el fenómeno sonoro. También se encontraron tres contenidos con una orientación hacia el arte, la música y la producción de sonidos.

Por otro lado, se encontraron cuatro temas cuyo propósito es crear conciencia. Dos de esos temas se refieren a una escucha activa del ambiente sonoro, uno a la resolución de problemas en comunidad y el último a la contaminación por ruido. En este último se establecen actividades para niños de quinto grado de primaria, para que mediante la investigación de campo y resolución de preguntas se lleguen a conclusiones de las posibles acciones para disminuir la contaminación auditiva y la preservación de espacios agradables. Se hace notar que los libros no cuentan con una carga teórica significativa y se solicita al docente y estudiantes que realicen investigación por su cuenta para complementar los ejercicios.

4. APLICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE SENSIBILIZACIÓN

Desde el año 2016, como parte del trabajo de investigación desarrollado por el Área, se han llevado a cabo campañas para conmemorar el "Día Internacional de Concienciación sobre el Ruido". Mediante la aplicación de una secuencia de actividades lúdicas creadas por el Área, se busca que los estudiantes aprendan, refuercen e integren conceptos nuevos referentes al sonido, la identidad sonora, las afecciones del ruido en la salud y a reconocer qué acciones pueden ejercer para mejorar su entorno sonoro. También se han realizado encuestas a docentes y estudiantes para saber sus opiniones respecto al ruido en el aula, preferencias o aversiones hacia determinados sonidos, sus hábitos en el uso de audífonos y qué herramientas y acciones conocen que contribuyan a mejorar el ambiente sonoro y a prevenir el daño auditivo.

Los resultados obtenidos en las primeras encuestas realizadas en el año 2016, 2017 y 2018 [25], indican en su mayoría que la presencia del ruido les genera estrés y molestia durante actividades de descanso, y que la principal fuente de molestia es la música o televisión a un volumen muy alto. Es importante mencionar que estas encuestas se realizaron fuera del ámbito escolar y las preguntas eran abiertas.

En el año 2018, también se realizó una encuesta en una escuela privada para conocer que sonidos les molestaban más en casa y en la escuela. Los resultados concluyeron que en casa, los electrodomésticos son los que más les molestan, seguidos de la música o televisión a un volumen muy alto. En la escuela, el sonido más molesto proviene del bullicio/gritos de los mismos compañeros, seguido de la chicharra y la alarma sísmica.

En el año 2020, se aplicó una encuesta [26] por medios digitales a 194 estudiantes de nivel secundaria y 292 estudiantes de universidad. Los resultados de la encuesta revelaron que hasta un 66% de los estudiantes de secundaria (rango de edad 11 a 15 años) tienen preferencia por los sonidos antropogénicos como la música y televisión, por encima de los naturales; a diferencia de los estudiantes de universidad (rango de edad de 18 a 24 años), quienes prefieren sonidos naturales como la lluvia y las aves. Se observa que existe una discordancia entre lo reportado en 2018 a 2020, ya que en la primera encuesta reportan que el ruido más molesto es la música y TV a un alto volumen, no siendo así para el año 2020 en donde se concluye que ese mismo sonido es de los que más les gusta. Es importante mencionar que la forma en la que se realizó la pregunta es distinta en ambos casos, ya que en la primera encuesta es una pregunta abierta y responde a: ¿Qué sonidos te molestan más? y la segunda es una pregunta de escala de cinco puntos y se enlistan varios sonidos ante la pregunta: ¿Cuánto te gustan los siguientes sonidos?

Debido a que la encuesta realizada en el año 2020 se realizó durante la pandemia, se incluyeron preguntas

relacionadas con el hábito de uso de audífonos antes y después de la pandemia (Figura 1). Se observa que más del 90% de los estudiantes encuestados, tanto de secundaria como de universidad, hacían uso de los audífonos previo a iniciar la pandemia y el principal uso que se les daba era para escuchar música. El periodo de tiempo que hacían uso de los audífonos el 41% de los estudiantes de secundaria, fue de 1 a 2 horas, el 18% de 2 a 4 horas y el 20% más de 4 horas. En el caso de los estudiantes de universidad se encontró que el uso de audífonos de 1 a 2 horas fue del 32%, de 2 a 4 horas el 33% y más de 4 horas el 19%. Una vez iniciada la pandemia se observa que el uso de audífonos incremento notablemente, siendo en ambos casos el mayor porcentaje el uso de audífonos por más de 4 horas al día. El uso principal fue para el seguimiento de las clases en línea, seguido del uso para escuchar música y videos.

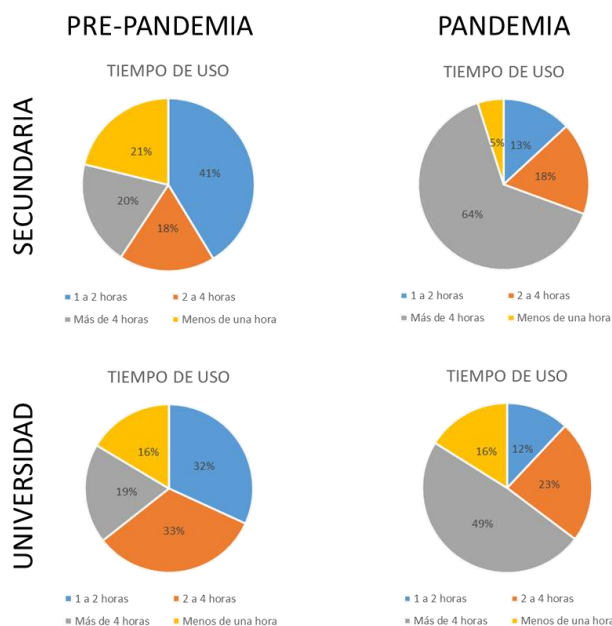


Figura 1. Uso de audífonos antes y en la pandemia 2020.

Respecto al tipo de sonidos que más les molestan (Figura 2), se encontró que para aquellos sonidos asociados al tráfico vehicular (en color verde) hubo una disminución de la molestia en general, sin embargo, se incrementó la molestia durante la pandemia específicamente ante la reproducción de grabaciones en vehículos que suelen transitar por las calles de

la ciudad para ofrecer algún servicio, recolección de basura o compra/venta de artículos.

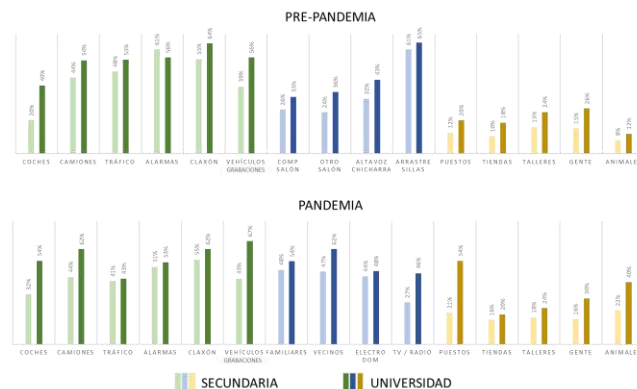


Figura 2. Molestia ante diferentes sonidos 2020.

En cuanto a la molestia causada por sonidos internos en el espacio en donde habitan (color azul), ya sea la escuela antes de la pandemia o en casa durante la pandemia, se observa un aumento considerable en la molestia por los sonidos de la casa, como los electrodomésticos, los vecinos o los familiares. Para el conjunto de sonidos que se desarrollan en la calle (color naranja), también se observa un incremento en la molestia ante los puestos ambulantes y los animales.

Durante los años 2021 y 2022, se realizaron entrevistas a niños de primaria y maestros para conocer más a fondo sus opiniones respecto al ruido ambiental y los efectos que éste tiene en la salud. En el caso de los niños se encontró que un porcentaje alto de los entrevistados no consideran al ruido como un contaminante, aunque tienen conocimiento de algunos de sus efectos en la salud, como el estrés, los dolores de cabeza y la pérdida de la audición.

En el caso de los maestros, todos saben que el ruido es algo molesto, sin embargo, sólo una persona entrevistada hizo referencia a que esto ocurre solamente en un espacio y momento determinado. Todos los maestros reconocieron que el ruido genera estrés, angustia, daño al oído, dolor de cabeza, que sube la presión arterial, que genera distracción y malestar. Sin embargo, nadie mencionó los efectos sobre el sistema endócrino, el sistema inmunológico o su influencia en la calidad del sueño.

En general se observó falta de conocimiento por parte de los maestros de cómo ellos pueden intervenir en el aula para corregir las condiciones acústicas y mejorar su funcionamiento. Todos opinaron que la ubicación de la escuela respecto a las vialidades sí tiene un impacto directo en las actividades dentro del aula, sin embargo, el ruido interno de las actividades mismas de la escuela como en los patios y pasillos tiene una influencia que afecta en mayor medida el desarrollo de las actividades.

En el año 2023, se realizó otra campaña en una escuela primaria y se aplicaron los juegos de sensibilización y una encuesta a 122 niños de tercer y cuarto grado (rango de edad 7 a 9 años). Como resultado de la encuesta se encontró que

más del 50% de los estudiantes de tercer grado no consideran al ruido como un contaminante a diferencia de los estudiantes de cuarto en donde el 64% si lo reconocen como tal (Figura 3).

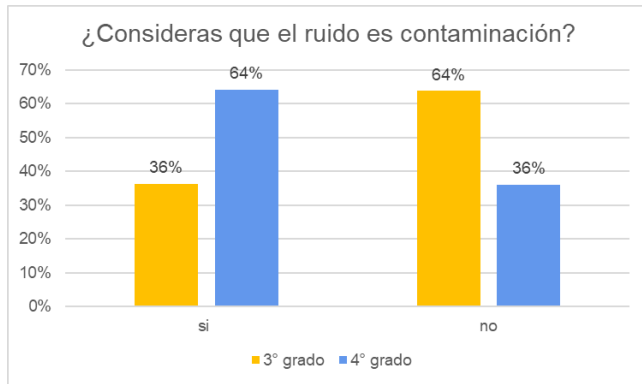


Figura 3. Encuesta respecto al ruido en 2023.

Además, se les consultó acerca de sus preferencias por determinados sonidos, y al igual que en la encuesta del 2020, se observa que los sonidos de música y televisión son más aceptados que los sonidos de la naturaleza, como la lluvia, el viento o el canto de las aves (Figura 4).



Figura 4. Gusto por los sonidos en 2023.

También se encontró gran similitud con la encuesta anterior de 2020 en lo que respecta a los sonidos que más les molestan. Si se sobreponen las gráficas de ambos resultados existe una correspondencia importante en los porcentajes de todos los sonidos, a excepción de los sonidos de vehículos con

grabaciones, los cuales estaban más presentes durante la pandemia y por lo tanto les molestaban más (Figura 5).

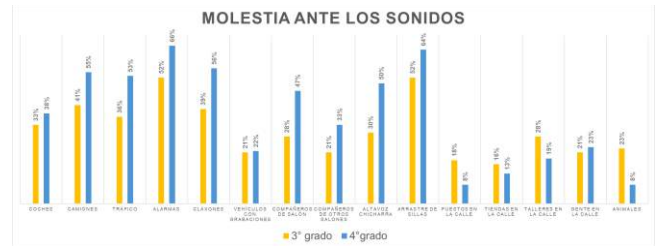


Figura 5. Molestia ante los sonidos en 2023.

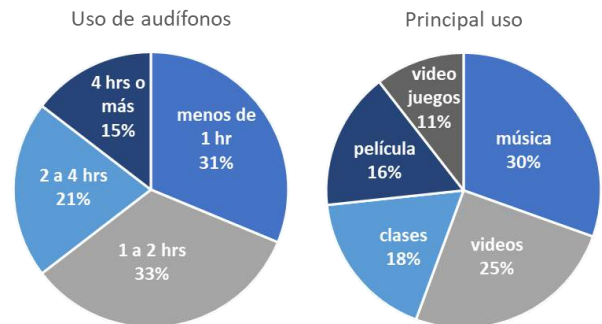


Figura 6. Uso de audífonos en 2023.

Por otro lado, la investigación mostró que el 77% de los estudiantes encuestados hace uso de audífonos y el 33% de ellos los utiliza de 1 a 2 horas, el 21% los utiliza de 2 a 4 horas y el 15% los utiliza por más de 4 horas diariamente. El uso principal es la escucha de música, seguida de los videos (Figura 6).

5. DISCUSIÓN

En general se observó que las actitudes de gusto y molestia ante diferentes sonidos varía dependiendo de la edad de los niños y adolescentes, siendo los más jóvenes los que aceptan más los sonidos tecnológicos sobre los sonidos naturales. Además, resulta preocupante el hecho de que, desde una edad muy temprana, algunos de ellos hacen uso de audífonos durante períodos prolongados, superando las 4 horas de exposición diaria, lo que implica un deterioro importante en su salud auditiva a mediano plazo. Por este motivo, se advierte que a muy temprana edad los niños y jóvenes se están acostumbrando a vivir inmersos en ambientes ruidosos.

Si bien, la OMS ha reconocido desde 1969 al ruido como un contaminante y ha generado campañas alrededor del mundo para informar a la población sobre esta problemática, se ha encontrado que la información no se difunde a todos los habitantes y se queda disponible principalmente en medios digitales. Debido a esta situación, es necesario generar campañas que se puedan difundir en diferentes niveles y

medios de comunicación para que el acceso sea cotidiano y esté al alcance de todos.

Aunado a esto, es importante que se genere información y material didáctico que pueda ser utilizado en diferentes niveles escolares, para que tanto docentes como estudiantes tengan un conocimiento más amplio de los efectos que tiene el ruido en la salud y no sólo eso, sino que también brinden estrategias prácticas de cómo combatir al ruido en diferentes ámbitos para mejorar el ambiente sonoro en donde se desenvuelven.

Como parte del desarrollo de la investigación llevada a cabo dentro del Área de Análisis y Diseño Acústico, se generó la siguiente propuesta metodológica para acercarse en primera instancia a los docentes y estudiantes de escuelas primarias al tema del sonido, ruido ambiental y contaminación acústica. Esta propuesta presenta varias acciones que se pueden llevar a cabo de manera regular, con la participación de todos los involucrados, con el propósito de sensibilizar y proporcionar información sobre este problema.

Propuesta metodológica:

- Realización de encuestas sobre la molestia y el bienestar respecto al ruido y la salud auditiva de los estudiantes y profesores.
- Implementación de campañas de sensibilización sobre el ruido ambiental mediante la aplicación de actividades lúdicas, que aborden temas como los fundamentos básicos del sonido, sus características, la diferencia entre sonido y ruido, la molestia comunitaria, el patrimonio sonoro y el ruido como contaminante.
- Desarrollo de actividades en casa y escuela que establezcan acciones claras para mejorar el ambiente sonoro y normas para una escucha segura.
- Utilización de sistemas tecnológicos como aplicaciones y semáforos de ruido para concientizarse sobre los niveles de ruido a los que se está expuesto cotidianamente.
- Experimentación y sensibilización mediante una escucha activa para determinar espacios de intervención y espacios de preservación.
- Aplicación de encuestas periódicas para reconocer cambio en actitudes ante diferentes tipos de sonidos y la salud auditiva.

6. CONCLUSIONES

El problema cultural respecto al ruido ambiental es que los habitantes, en especial los niños, de la Ciudad de México aceptan al ruido como un elemento de la vida cotidiana, sin conocer la totalidad de los efectos negativos que éste tiene en su salud. En este sentido, es necesario generar campañas y programas que informen a la población con relación a este tema.

Generar conciencia sobre el problema del ruido ambiental debe ser un trabajo conjunto entre el gobierno, encargado de emitir políticas públicas acordes a la cultura e informar a la sociedad; los profesionales, que bajo principios éticos pueden contribuir en beneficio de la población desde múltiples disciplinas; y de la misma sociedad, informándose y reconociendo que cada uno puede ayudar a mejorar las condiciones del ambiente sonoro de su entorno para promover el bien común.

Finalmente, el camino para lograr esto último no es sencillo. La tarea de informar a la sociedad es el primer paso para reconocer al ruido como un contaminante, sin embargo, hacer que la población modifique su actitud y sus acciones tiene una base filosófica mucho más profunda, que se puede ir forjando desde edades más tempranas.

7. REFERENCIAS

- [1] Stewart, J. *Why noise matters? A worldwide perspective on the problems, policies, and solutions*. Earth Scan, UK, 2011.
- [2] WHO. World Health Organization. *Burden of disease from environmental noise*. Quantification of healthy life years lost in Europe, World Health Organization, European Commission. Copenhagen, 2011.
- [3] Berglund, B. y Lindvall, T., *Guidelines for community noise*. World Health Organization (WHO), Stockholm, SE, 1995.
- [4] Hetu, R., Truchon-Gagnon, C. y Bilodeau, S.A. "Problems of noise in school settings: a review of literature and the results of an exploratory study", *Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*; 14(3), 31-38, 1990.
- [5] Evans, G.W. y Lepore, S.J. "Nonauditory effects of noise on children: a critical review". *Children's Environments*; 10(1), 31-51, 1993.
- [6] Shield, B.M. y Dockrell, J. E. "The Effects of Noise on Children at School: A Review", *Building Acoustics*; 10 (2): 97-103, 2003.
- [7] Klatt, M., Bergström, K., Lachmann, T., "Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children", *Frontiers in Psychology*; 4:578, 2013.
- [8] Astolfi, A., Puglisi, G. E., Prato, A., Murgia, S., Minelli, G. y Sacco, T., "Well-being and noise annoyance outcomes from first graders and relationships with classroom acoustics", *23rd International Congress on Acoustics*, Germany; 5910-5917, 2019.
- [9] Brännström, K. J., Johansson, E., Vigertsson, D., Morris, D. J., Sahiön, B. y Lyberg-Åhlander, V., "How Children perceive the Acoustic Environment of Their School", *Noise Health*; 19:84-94, 2017.
- [10] Servilha, E. A., Delatti, M., "College students' perception of classroom noise and its consequences on learning quality", *Audiology - Communication Research*; vol.19, n.2, 138-144, 2014.
- [11] Lim, J., Kweon, K., Kim, H. W., Cho, S. W., Park, J., y Sim, C. S., "Negative impact of noise and noise sensitivity on mental health in childhood", *Noise & health*, 20(96), 199-211, 2018.
- [12] Rudner, M., Lyberg-Ahlander, V., Brännström, J., Nirne, J., Pichora, M. K. y Sahlén B., "Listening Comprehension and Listening Effort in the Primary School Classroom", *Frontiers in Psychology*; 9:1193, 2018.
- [13] Organización Mundial de la Salud. "Sordera y Pérdida de La Audición Datos y Cifras Descripción General." 2023. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>
- [14] Campuzano Martha, Bustamante Liliana, Karam Miguel, Ramírez Ninfa. "Relación Entre Ruido Por Carga Vehicular, Molestia y Atención

Escolar En Estudiantes de Nivel Básico de La Ciudad de Toluca 2004.”
Ciencias de La Salud Humana 17 (1): 46–50, 2004.

[15] Estrada-Rodríguez, Cesáreo, and Ignacio Méndez-Ramírez. “Impacto Psicológico Del Ruido Ambiental En Escuelas: Estudio Comparativo Del Efecto Diferencial Del Ruido.” *Revista Latinoamericana de Medicina Conductual / Latin American Journal of Behavioral Medicine* 4 (1): 13–20, 2014.

[16] Gutiérrez-Farfán, Ileana, Emilio Arch-Tirado, Ana Luisa Lino-González, and Laura Julia Jardines-Serralde. “Daño Auditivo Inducido Por Ruido Recreativo.” *Salud Pública de México*, 60 (2): 126–126. 2018. <https://doi.org/10.21149/9042>,

[17] Orozco, M, and A González. “La Importancia Del Control de La Contaminación Por Ruido En Las Ciudades The Importance of the Control of Noise Pollution in the Cities.” *Universidad Autónoma de México* 19 (2): 1665–529, 2015. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750925006.pdf>.

[18] Rodríguez, Perla Olivia. “El Ruido y La Violencia Acústica En La Escuela: Sonidos En El Aula. Propuesta Para La Prevención Social de La Violencia En La Educación Inicial En México 1.” *Ixaya. Revista Universitaria de Desarrollo Social*, 51–74. 2015. http://ixaya.cucsh.udg.mx/sites/default/files/el_ruido_y_la_violencia_acustica_en_la_escuela.pdf.

[19] Lago, Castro. La contaminación sonora: Una nueva forma de violencia social. *En Tavira* (0214137X-)2003, n. 19, 97-109. 2003.

[20] Secretaría de Educación Pública (SEP). “Normas y especificaciones para estudios proyectos, construcción e instalaciones”, *Infraestructura Educativa*, Volumen 3, Tomo IV - Acondicionamiento Acústico; 1-28. 2014.

[21] Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. Página consultada agosto 2023. https://paot.org.mx/conocenos/que_es_paot.php

[22] Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial / Ruido. Página consultada agosto 2023. http://www.paot.org.mx/micrositios/sabias_que/RUIDO/tema_2.html

[23] Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial / Comunicado. Página consultada agosto 2023. http://www.paot.org.mx/centro/comunicados_sintesis/2019/com_14.pdf

[24] Comisión Nacional de Libros de texto gratuitos. Ciclo 2023-2024. Consultado en agosto 2023. <https://www.conaliteg.sep.gob.mx/primaria.html>

[25] Garay, E., Lancón, L., Arroyo, V., García, S. “Instrumentos de sensibilización ante el ruido ambiental para niños de educación básica de la CDMX. Diseño y Aplicación”, *TecniAcústica*. 2018.

[26] Garay, E., Lancón, L., “El rol de los juegos en el proceso de sensibilización ante el ruido”. Presentación para el evento del Instituto para el Acondicionamiento Conservación y Desarrollo Territorial. Día Internacional de la Concienciación sobre el Ruido. Perú. 2020.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

MNA-0 Métodos numéricos en acústica. Acústica computacional.

A COMPARISON OF ACOUSTIC SOLVERS FOR FT ULTRASONIC WIND SENSORS

Antonio Jimenez-Garcia^{1*}
Ganesh Chandrasen Diwan²

¹Lead Research Engineer, FT Technologies, Sunbury House, Sunbury-on-Thames, TW16 7DX, UK
²Acoustic Researcher, Prescient Computing, Woking, GU21 3HT, UK

ABSTRACT

FT wind sensors measure wind speed and direction by using an acoustic field that is superimposed on a flow field in an acoustic resonator equipped with piezoelectric transducers. To improve the accuracy of wind measurements in compliance with the evolving requirements of the wind energy industry, the geometric design of FT wind sensors went through several design iterations to optimise the acoustic field and its interaction with the flow field. Finite Element based simulation tools are used to research and rapidly optimise the acoustic behaviour of FT wind sensors. The Multiphysics Research team ensures that the accuracy and reliability of the numerical methods and simulation software are adequate.

In this paper, two acoustics software packages are compared, namely COMSOL Multiphysics®, a commercial software and NGSolve, an open-source general-purpose finite element library. First, a mesh convergence study is presented using a canonical 3D acoustic scattering problem. A practical application of FT wind sensors is then studied to assess the accuracy of both software. In this regard, the effect of different boundary treatments such as impedance condition and Perfectly Matched Layer are evaluated. Finally, CPU overhead of the direct solvers is also presented.

Keywords—acoustic solvers, comsol, ngsolve, finite element method, acoustic resonance

1. INTRODUCTION

FT Technologies [1] follows an iterative research prototyping in the design of its wind sensor geometries. The methodology involves the design, testing, and evaluation of prototypes, taking into account a multiphysics perspective that specifically emphasizes acoustics, aerodynamics, and aeroacoustics amid other relevant disciplines. The capability to numerically simulate the physics of the interaction of acoustic and aerodynamic fields and the geometry enables us to improve our current designs and iterate over future sensor designs. Consequently, FT Technologies relies on high-fidelity numerical models and on the accuracy of numerical methods to address the complexity of sensor acoustics and aerodynamics [2] within the realm of ultrasonic frequencies, turbulent flow, and high velocities.

The analytical solutions for acoustic fields for such complex geometries are almost impossible to build and a combination of numerical simulations and experimental data is therefore required. Frequently, numerical simulations provide a deeper understanding of the underlying physics of the problem, revealing insights that may remain inaccessible through experimental measurements alone. It is crucial, however, when using numerical techniques to guarantee the high accuracy of the numerical methods through the use of appropriate boundary conditions, quality of the mesh, convergence of the solution, and numerical stability [3].

In this context, this paper aims to conduct a comparison between two acoustic software to accurately resolve in the absence of flow, the acoustic field of FT wind sensors governed by the scalar Helmholtz equation. The commercial software COMSOL Multiphysics® [4] and NGSolve [5], an open-source finite element library are utilized here. The analytical solution of the scattering of waves from a spherical obstacle [6] with a diameter matching that of an FT wind sensor is first numerically studied to showcase the convergence of both software as the frequency increases from 20 kHz to 40 kHz. The sensitivity of the solution to changes in the mesh density and the use of first-order and second-order Lagrange discretization schemes are evaluated. Next, a simplified geometry of an FT wind sensor is employed to investigate how the size of the computational domain and the density of the mesh impact the acoustic field with the use of both software. Subsequently, the effectiveness of reducing reflections at the computational domain's boundaries is explored using the Perfectly Matched Layer (PML) and Acoustics Impedance techniques. Finally, the CPU load is documented, and conclusions are drawn based on the numerical outcomes, resulting in the formulation of recommendations.

2. ACOUSTIC SIMULATION SOFTWARE

In this study, two acoustic simulation software are numerically compared for the purpose of resolving acoustic fields. The following paragraph provides a concise introduction to both software tools.

2.1. COMSOL Multiphysics® Software

The COMSOL Multiphysics® software [4] is a powerful commercial simulation software package that addresses the numerical modelling

* **Corresponding author:** antonio.jimenez-garcia@ftechnologies.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

of single-physics and coupled multiple disciplines such as electromagnetics, fluid flow, heat transfer, chemical reactions, structural mechanics, and acoustics. It offers a streamlined workflow that encompasses the entire process of modelling, starting from geometry generation to the analysis of results. Multiple numerical methods are available for modelling pressure acoustics, including the following: Finite Element Method (FEM), Boundary Element Method (BEM), and Hybrid FEM-BEM in the frequency domain and the discontinuous Galerkin finite element method (dG-FEM) in the time domain [7]. For efficiently addressing radiation and scattering problems with complex geometries, the FEM proves to be a suitable approach for smaller-scale problems. Consequently, in this research, the FEM is employed along with either the PMLs or impedance boundary conditions to simulate the behaviour of the unbounded computational domain.

All the modelling steps such as defining the physics, boundary conditions, discretization order and solver settings are defined through a single graphical user interface. The meshing is performed by COMSOL Multiphysics® using its own meshing algorithm and it can handle three-dimensional geometries and various element types, including tetrahedral, hexahedral, pyramidal, and prismatic. To solve the systems of linear equations, direct and iterative solvers are available in COMSOL Multiphysics®. For problems characterized by a small number of degrees of freedom and lower memory demands, selecting a direct solver such as MUMPS often proves to be the more advantageous choice [7]. For large 3D models, the first suggestion is to use iterative methods such as the multigrid, including GMRES with GMG and FGMRES with GMG for problems that exhibit sharp resonances [7].

2.1. NGSolve Software

NGSolve [5] is an open-source finite element library built on top of Netgen/NGSolve and enables the implementation of physical equations and algorithms through a user-friendly Python interface. It also offers a unified analysis framework that is available via a GUI by providing a seamless integration of all the steps from geometrical modelling to analysis and visualization. Similar to the preceding section featuring COMSOL Multiphysics®, the FEM is utilized in the context of NGSolve. Within the framework of FEM, the choice of test functions and basis functions lead to different finite element method formulations. The Galerkin method is used to discretize the mathematical model equations for both software.

The three-dimensional finite element mesh generator Gmsh [8] is employed and it has been integrated into NGSolve's framework. It can also handle various types of two and three-dimensional elements. Both direct and iterative solvers are available within NGSOLVE. To facilitate comparison in terms of CPU loads with COMSOL Multiphysics®, a direct solver has been chosen as the primary option.

3. GOVERNING EQUATION

The analysis of the scattering of waves from a spherical obstacle alongside the acoustic field of FT wind sensors in the absence of flow is governed by the scalar Helmholtz equation. For an inviscid, compressible, and irrotational fluid, with no mean flow or source term, the acoustic pressure, p satisfies the wave equation (1), see [9].

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

with c being the speed of sound. For a time-harmonic vibration at pulsation ω with amplitude P , such that $p = P e^{i\omega t}$, the equation (1) reduces to the scalar Helmholtz equation (2):

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

Here $k = \omega/c$ represents the wavenumber, which is also equivalent to $k = 2\pi/\lambda$ with λ being the wavelength of the acoustics pressure. In this study, the following boundary conditions are considered.

Sound-hard boundary (wall): The normal component of the velocity is zero. In simple terms, this also refers to the normal derivative of the total acoustic pressure being zero, thus, $\partial p / \partial \mathbf{n} = 0$ where \mathbf{n} is the unit normal vector to the wall.

Prescribed normal velocity: It relates the velocity to acoustic pressure as $v_n = -i \frac{1}{\rho \omega} \partial p / \partial \mathbf{n}$, where ρ is the density of the medium and i the imaginary unit.

Sommerfeld radiation condition: For an exterior problem, the acoustic wave radiates from a source must scatter to infinity and this is mathematically expressed as the Sommerfeld radiation condition [10]:

$$\lim_{|\mathbf{r}| \rightarrow \infty} |\mathbf{r}| \left(\frac{\partial}{\partial |\mathbf{r}|} + ik \right) p(\mathbf{r}) = 0 \quad (3)$$

here \mathbf{r} denotes the position vector of a point in three-dimensional space with respect to origin. The system of equations (2)-(3) with boundary conditions forms the Helmholtz equation system that needs to be solved with an appropriate numerical method.

The absorption of sound in air through thermal conduction effects, viscous effects, and molecular relaxation [11] processes are not accounted for in this study. In this context, pressure acoustics is only modelled.

4. PROBLEM FORMULATION AND NUMERICAL STUDIES

In this section, numerical outcomes corresponding to the scattering of plane wave by a rigid sphere, as well as the acoustic field of a simplified geometry of the FT wind sensor are showcased through the use of the NGSolve and COMSOL Multiphysics® software.

The acoustics resonance anemometer, invented by Savvas Kapartis [12], measures phase shifts between a pair of transducers induced by the flow of a fluid within an acoustic resonant cavity. A standing wave perpendicular to the direction of the flow of the fluid and a travelling wave perpendicular to the standing wave is created in the acoustic resonant cavity and it is energised by one of the three ultrasonic transducers. Through the utilization of phase shifts at resonance between the acoustic signal of a pair of transducers, it is possible to compute the fluid flow velocity and its direction. The sensor inherently compensates for variations in the environment, specifically, temperature, humidity and pressure, resulting in a technology immune to changes in the speed of sound. Furthermore, operating within ultrasonic resonances offers a high signal-to-noise ratio advantage. This, in combination with a solid-state (no moving parts) technology, provides a well-suited anemometer for a diverse harsh environmental scenario where accuracy both on the flow field and direction is essential.

Figure 1 shows a simplified FT742 wind sensor geometry where grooves, notches, and turbulators were removed and the resonator cavity was simplified. The sensor has an external diameter

of 55 mm and the entrance to the resonator cavity measures 9.5 mm. This in combination with an internal step of 0.5 mm results in a resonator gap of 10 mm.

The structural mechanical and piezoelectricity coupling of the transducers with the acoustic resonator anemometer is not modelled in this study. Instead, the transducers are modelled using a prescribed normal velocity.

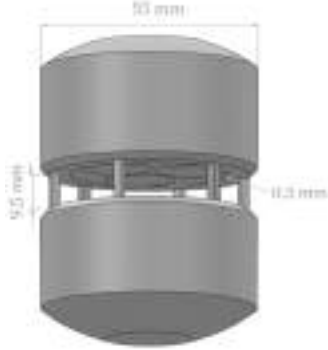


Figure 1: Simplified FT742 wind sensor geometry [1].

As stated earlier, FT wind sensors operate within the ultrasonic frequency range and in the absence of flow, the standing wave generated inside the acoustic resonator is excited a one wavelength, coinciding with the resonator gap of 10 mm. At an ambient temperature of 20°C and with zero wind speed, the resonance frequency is determined to be 35.2 kHz.

4.1 Scattering of Plane Wave from a Spherical Obstacle

The analysis of the scattering of waves from a rigid spherical obstacle is a well-studied problem in acoustics [6]. It contains an analytical solution that can serve as a reference for assessing the performance of acoustics software. In this context, this canonical problem is employed to illustrate the convergence of the numerical methods, as accurately capturing scattering becomes more challenging with increasing frequency [13].

Let us assume that a plane wave of the form $p_p e^{ikx}$ is propagating in the x-direction and is impinged upon a rigid sphere of radius a . The analytical solution for the scattered pressure field due to the incident plane wave is given by [14]:

$$p_s(r, \theta) = -p_p \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) i^m \frac{J'_m(ka)}{H'_m(ka)} P_m(\cos \theta) H_m(kr) \quad (4)$$

where J_m is the spherical Bessel function of the first kind, H_m is the spherical Hankel function of the second kind, P_m is the Legendre function of the first kind, and (r, θ) are the polar coordinates. The primed function such as $J'_m(ka)$ indicates a derivative of $J_m(ka)$ with respect to its argument ka . The total pressure is computed as the sum of the incident field and scattered field, with $p_p = 1$ and is given by:

$$p = p_s + p_p e^{ikx} \quad (5)$$

NGSolve and COMSOL Multiphysics® acoustics software are employed to calculate the numerical error, denoted here as p_h , with

respect to the analytical solution p . A direct solver is used for both software. The error in the finite element solution p_h is given by the following equation:

$$e_h = \frac{\|p - p_h\|_{\Omega_h}}{\|p\|_{\Omega_h}}$$

where Ω_h is the domain of computation discretized using a finite element mesh. Given the three-dimensional nature of the FT wind sensor, it is advisable to assess the performance of both acoustic solvers using a spherical scattering problem. To align with the 55 mm diameter of the sensor (see Figure 1), it is adopted here a sphere with a diameter of 55 mm for this study. The medium considered here is air with a speed of sound equal to 343.2 m/s.

The spherical symmetry of the problem is exploited here to simulate just one-quarter of the complete geometry. The sensitivity of the numerical solution to changes in the mesh density and the use of first-order (linear elements) and second-order (quadratic elements) Lagrange discretization schemes is evaluated. The analysis is taken within ultrasonic frequency range, specifically at the frequencies of 20 kHz, 35.2 kHz, and 40 kHz. Table 1 lists the numerical cases performed with the solvers NGSolve and COMSOL Multiphysics®. Number of elements per wavelength elm/λ equal to 4, 8, 10, 12, and 16 are evaluated with a first-order Lagrange, while 4, 8, and 10 are considered with a second-order.

Table 1: Numerical cases performed with NGSolve and COMSOL Multiphysics®, illustrating the discretization order and number of elements per wavelength employed.

Discretization Order	elm/λ
First-order Lagrange (p1)	4, 8, 10, 12, 16
Second-order Lagrange (p2)	4, 8, 10

Figure 2 shows a comparison between the two software in calculating the L^2 -errors using first-order Lagrange elements at frequencies of 20 kHz, 35.2 kHz, and 40 kHz. As the mesh undergoes refinement levels by increasing the number of elements per wavelength, a gradual reduction is observed in the relative L^2 -error, e_h with both software. Nonetheless, a minimum of 12 elements per wavelength is necessary to achieve a reduction in the L^2 -errors below 10%.

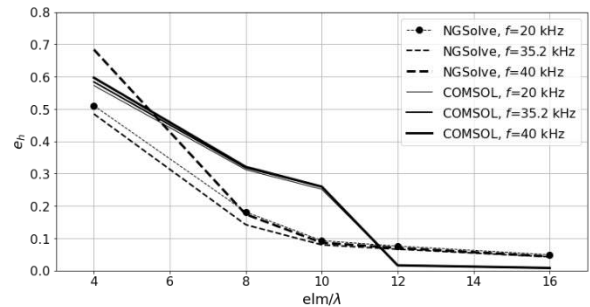


Figure 2: Comparison between NGSolve and COMSOL® for the scattering of a plane wave from spherical obstacle of diameter 55 mm, illustrating L^2 -errors for frequencies of 20 kHz, 35.2 kHz and 40 kHz using first-order Lagrange elements.

Reducing the number of elements per wavelength can be achieved by increasing the order of the discretization elements. In this regard, Figure 3 shows the relative L^2 -error using a second-order Lagrange approximation. In order to reduce the L^2 -errors within (10^{-1}) for this canonical problem, the use of at least 8 elements per wavelength with second-order Lagrange approximation would be required.

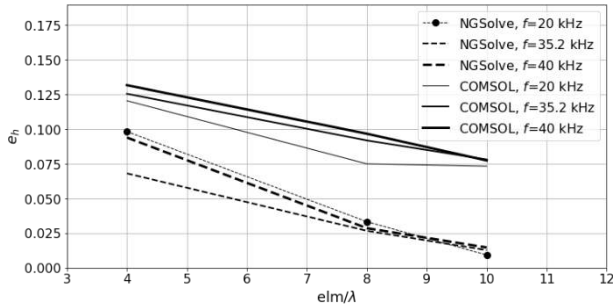


Figure 3: Comparison between NGSolve and COMSOL® for the scattering of a plane wave from spherical obstacle of diameter 55 mm, illustrating L^2 -errors for frequencies of 20 kHz, 35.2 kHz and 40 kHz using second-order Lagrange elements.

4.2 Simplified Geometry of FT Wind Sensor

The acoustic field of a simplified geometry of an FT wind sensor (depicted in Figure 1) is investigated using the NGSolve and COMSOL Multiphysics® software. Transducers are not explicitly modelled; instead, a unit normal velocity is applied to the transmitting transducer. In each case, the total acoustic pressure response is first averaged over the surface of the receiving transducer and then normalized by its maximum value. Quadratic Lagrange was selected for all computations and a frequency sweep from 34.6 kHz to 36 kHz with 20 Hz step was chosen. Computations were performed on a Desktop PC with Intel(R) Core(TM) i9-10900K CPU at 3.70 GHz clock speed, 64 Gb of memory.

4.2.1. Results of COMSOL Multiphysics® Acoustic Software

The impact of changes in mesh density on the acoustic field of the simplified geometry is initially studied using an identical computational domain. The simulation covers the entire domain, including the three transducers and number of elements per wavelength of 4, 6, and 8. The horizontal distance to the PML boundaries remains constant and is set to 3λ . The computational details of this initial test group (effect of the mesh density) are listed in Table 2 and indicated as ID01, ID02, and ID03. Figure 4 (a) illustrates the dimensions of the extended computational domain alongside the boundary conditions employed, utilizing a symmetry plane to enhance clarity. Details of the surface and volume mesh using a PML boundary condition using the coarsest ($4 \text{ elm}/\lambda$) and finest ($8 \text{ elm}/\lambda$) meshes are illustrated in Figure 5. The primary body consists of tetrahedral elements while the PML region employs hexahedral elements. A consistent six elements per wavelength is kept constant within that region and in line with recommended practice in COMSOL Multiphysics®.

The acoustic response as a function of the mesh density is shown in Figure 6. The first peak observed at 35,200 Hz aligns with the resonator's second harmonic and corresponds to a wavelength equal to the separation between the two parallel plates of 10 mm, while the subsequent peak at 35,580 Hz corresponds to one of the

acoustics modes of the resonator. Although employing 4 elements per wavelength appears inadequate to capture the acoustic response, it becomes evident that utilizing 6 elements per wavelength with quadratic Lagrange elements proves sufficient for capturing the acoustic response while achieving a considerable reduction of the computational time from 35 hrs and 10 min for $8 \text{ elm}/\lambda$ to 8 hrs and 3 min for $6 \text{ elm}/\lambda$ (see Table 2).

Table 2: Numerical details of conducted simulations using COMSOL Multiphysics® for the simplified geometry of the FT wind sensor. BC=Boundary Condition; DB=Distance to Boundaries; DoF=Degree of Freedom. The direct solver MUMPS is used here.

ID	No Sym Sym	DB	elm/ λ	DoF	BC	CPU(s)
01	No Sym	3λ	4	885 k	PML	4827
02	No Sym	3λ	6	2308 k	PML	30782
03	No Sym	3λ	8	4815 k	PML	126624
04	Sym	3λ	6	1178 k	PML	9877
05	Sym	2λ	6	803 k	PML	4713
06	Sym	1λ	6	489 k	PML	1966
07	Sym	0.5λ	6	361 k	PML	1148
08	Sym	3λ	6	533 k	IMP	1775
09	Sym	2λ	6	355 k	IMP	981
10	Sym	1λ	6	208 k	IMP	449
11	Sym	0.5λ	6	149 k	IMP	281

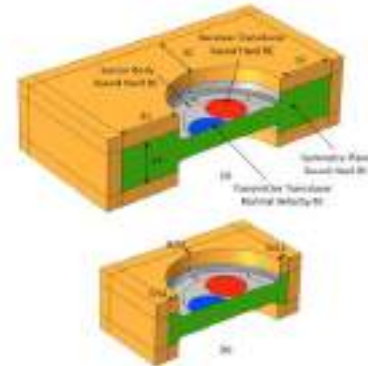


Figure 4: Details of (a) the extended domain and (b) reduced computational domain with a distance of 3λ and 0.5λ to PML.

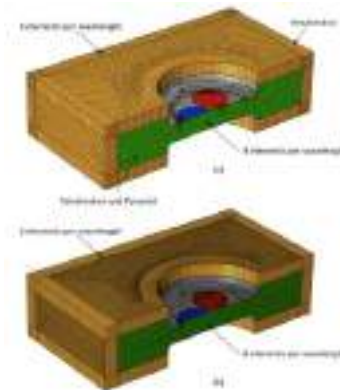


Figure 5: Details of the surface and volume mesh with a PML boundary condition using (a) $4 \text{ elm}/\lambda$ and (b) $8 \text{ elm}/\lambda$.

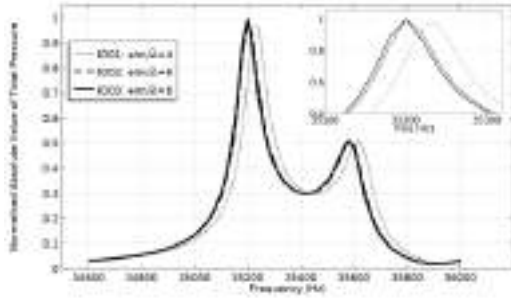


Figure 6: Effect of mesh density study on acoustic response with a PML boundary condition.

The effect of a symmetry plane on the acoustics response when using 6 elements per wavelength for a computational domain with a distance to the boundary equal to 3λ (Figure 4 (a)) is shown in Figure 7 when comparing ID2 and ID4. No differences in the acoustic response are evident even though a significant reduction of the degree of freedom is achieved. Similarly, the influence of the computational domain's size is evaluated on the same graph by decreasing the distance from its boundary from 3λ (ID4) to 0.5λ (ID7), while keeping all other variables constant. No changes in the predictions of the first and second peaks are observed.

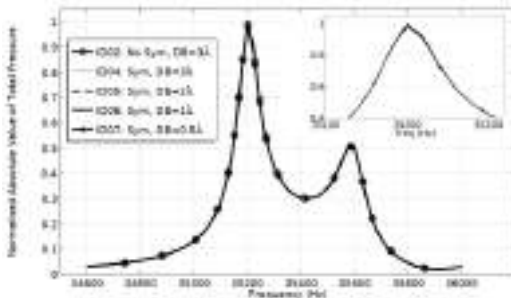


Figure 7: Effect of symmetry plane (ID02 vs ID04) and effect of computational domain size (ID04 to ID07) on acoustic response with a PML boundary condition.

The last test group evaluated here is the effect of replacing the PML with an impedance boundary condition (ID08-ID11 in Table 2) whereas reducing the computational domain from 3λ to 0.5λ and maintaining the size number of elements per wavelength of 6 (see Figure 8). Despite achieving a significant reduction in CPU usage (281s for ID11), no substantial variations were identified in the prediction of the first and second peaks' frequency when reducing the domain size. Similar results were obtained with PML boundary conditions.

The acoustics quality factor Q, associated with the initial peak, could serve as a performance metric of the numerical simulations, providing a quantitative assessment. The most refined mesh with no symmetric plane applied, and featuring the largest computational domain yields a value of 469 for the acoustics quality factor (ID03). The comparison with ID04 (see Table 2) led to a 1.23% reduction in Q-factor (see Figure 9). The effectiveness of the PML boundary condition in modelling the non-reflecting infinite domain is manifested by comparing ID04 ($BC=3\lambda$) with ID07 ($BC=0.5\lambda$) through Q-value. A mere 1.22% decrease is observed in Q-value whereas a 760% reduction on the CPU is achieved. A similar trend is observed when employing the impedance boundary condition

with a reduction of 3.8% when compared ID08 ($BC=3\lambda$) with ID11 ($BC=0.5\lambda$) with a reduction of 531% on CPU.

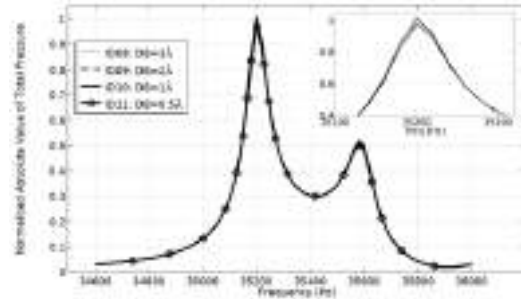


Figure 8: Effect of computational domain size on acoustic response with an impedance boundary condition.

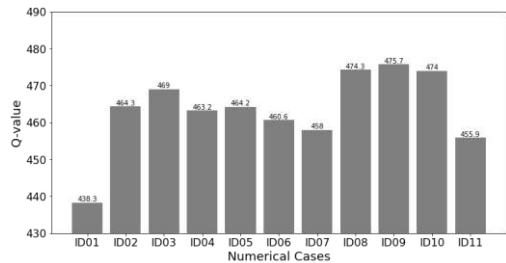


Figure 9: Q-value corresponding to the first peak for cases performed with COMSOL Multiphysics®.

The reason behind the minimal effect of the distance to the boundary either with PML or impedance boundary conditions on the acoustics signal and Q-value could be explained in Figure 10. It shows the total value of pressure at (a) the first peak frequency of 35,200 Hz and (b) the second peak frequency of 35,580 Hz for case ID4. As observed, the resonator effectively confines the acoustic field, minimizing the influence of the computational domain size on the acoustic response.

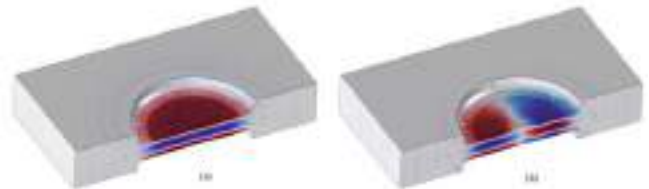


Figure 10: Total value of pressure at (a) 35,200 Hz and (b) 35,580 Hz for the case ID4 (see Table 2).

4.2.2. Results of NGSolve Acoustic Software

Considering the small impact of the treatment of the boundary condition on the acoustics field, the NGSolve acoustic software is evaluated with the use of the impedance boundary condition due to its ability to significantly reduce the CPU when compared with PML. Table 3 lists the numerical details of the simulations conducted with NGSolve with the direct solver Sparse Cholesky. This study involves the evaluation of two test groups. The first group focuses on the sensitivity of the solution to the mesh density (ID12-ID15) with a fixed computational domain size ($BC=3\lambda$). After selecting the appropriate mesh, the second group (ID16-ID18) focused on the impact of the distance to the boundary condition on

the acoustic field. It is noted that to accurately capture the frequencies of the first and second peaks and the Q-value, a minimum of 10 points per wavelength is required when using NGSolve with second-order Lagrange discretization schemes (see Figure 11 and Table 3). The impact of the distance to the boundary conditions is also reported in Table 3 through Q-value, and a 2.43% decrease is observed when comparing ID14 with ID18 whereas a reduction of 1014% on CPU is achieved.

Table 3: Numerical details of conducted simulations using NGSolve for the simplified geometry of the FT wind sensor. The direct solver Sparse Cholesky is used here.

ID	No Sym Sym	DB	elm/ λ	DoF	BC	CPU(s)	Q-value
12	Sym	3λ	6	164 k	IMP	1627	484.3
13	Sym	3λ	8	367 k	IMP	8017	449.4
14	Sym	3λ	10	696 k	IMP	33125	481.7
15	Sym	3λ	12	1175 k	IMP	96110	476.7
16	Sym	2λ	10	466 k	IMP	14720	482.3
17	Sym	1λ	10	280 k	IMP	6373	480.9
18	Sym	0.5λ	10	203 k	IMP	2971	465.1

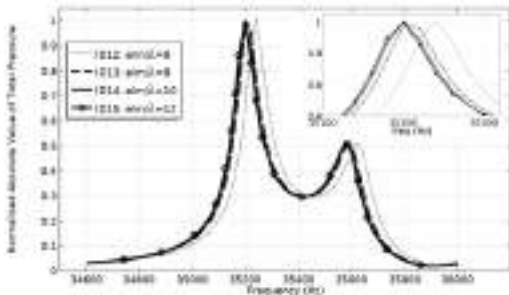


Figure 11: Effect of mesh density study on acoustic response with an impedance boundary condition.

Lastly, a comparison between the numerical solutions obtained with both acoustic software using the same computational domain size ($BC=1\lambda$) is shown in Figure 12. Both curves are nearly indistinguishable with a difference in Q-factor of less than 1.5%. While COMSOL® simulations require 2.15 s per 1000 DoF when utilizing the direct solver MUMPS, NGSolve necessitates 22.76 s per 1000 DoF when employing the direct solver Sparse Cholesky on the same Desktop PC.

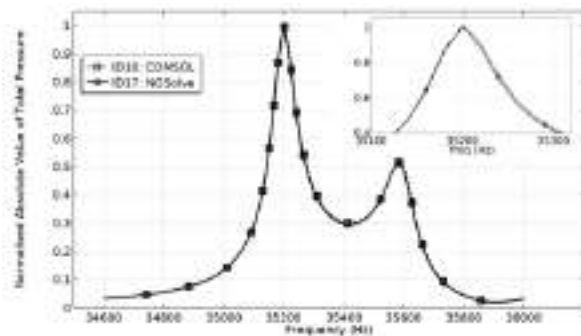


Figure 12: Numerical comparison between both acoustic software using the same computational domain size ($BC=1\lambda$) of a simplified geometry of FT wind sensor.

5. CONCLUSIONS

The commercial acoustic software COMSOL Multiphysics® and the open-source finite element library NGSolve are compared in this study using a canonical 3D acoustic scattering problem at first, and a simplified geometry of a FT wind sensor. In the context of the scattering problem, to reduce the L^2 –errors within (10^{-1}), the use of at least eight elements per wavelength with second-order Lagrange approximation would be required for both software.

The acoustics field of the simplified FT wind sensor is not affected by using a symmetry condition. When using COMSOL®, simulations with PML and impedance boundary conditions require 6 elm/λ to capture the frequency of the first and second peaks. The effect of reducing the computational domain has a 1.22% and 3.8% decrease in Q-value for both boundary conditions, whereas a 760% and 531% reduction in the CPU are achieved. NGSolve requires a 10 elm/λ to accurately capture the main resonant frequency, and when compared to COMSOL®, a similar acoustics field is obtained. For the direct solvers study here, COMSOL® simulations show a CPU time that is one order of magnitude lower when compared with NGSolve. Further studies are needed to quantify how various direct and iterative solvers impact the CPU and memory loads.

6. REFERENCE

- [1] FT Technologies. <https://ftechnologies.com/>. (Last Accessed: August 14, 2023).
- [2] G. Quixley and A. Jimenez-Garcia, “Aerodynamic Analysis of FT Ultrasonic Wind Sensor Using Computational Fluid Dynamics”, 17th OpenFOAM Workshop, Cambridge, July, 2022.
- [3] A. Nouredine, and F. Sgard. *Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration*. CRC Press, 2015.
- [4] COMSOL Multiphysics® v. 6.1. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. (Last Accessed: August 14, 2023).
- [5] Joachim Schöberl, C++ 11 Implementation of Finite Elements in NGSolve. Tech. Rep. ASC-2014-30, Institute for Analysis and Scientific Computing, 2014.
- [6] P. M. Morse, *Vibration and Sound*. Vol. 2. Acoustical Society of America, and American Institute of Physics. New York: McGraw-Hill, 1948.
- [7] Acoustics Module User's Guide, pp. 63-153. COMSOL Multiphysics® v. 6.1. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2022.
- [8] Gmsh website. <https://gmsh.info/>. (Las Accessed: August 23, 2023).
- [9] Lawrence E Kinsler, Austin R Frey, Alan B Coppins, and James V Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, 2000.
- [10] A. Sommerfeld. *Partial Differential Equations in Physics*. Academic press, 1949.
- [11] ANSI Standard S1-26:1995, "Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere" (ISO 9613-1:1996).
- [12] S. Kapartis "Anemometer employing standing wave normal to fluid flow and travelling wave normal to standing wave." U.S. Patent No. 5,877,416. 2 Mar. 1999
- [13] F. Ihlenburg and I. Babuška. “Finite Element Solution of the Helmholtz Equation with High Wave Number Part I: The h-version of the FEM,” *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 30, no. 9, pp. 9–37, 1995.
- [14] P. M Morse, H. Feshbach, and E. L. Hill. “Methods of Theoretical Physics,” *American Journal of Physics*, vol. 22, no. 6, pp. 410–413, 1954.

VIBRATION AND RADIATED NOISE COMPUTATION FROM RAILWAY SYSTEMS USING A BEM METHODOLOGY

Antonio Romero Ordóñez^{1*}
Rocío Velázquez Mata¹
Pedro Galvín Barrera¹

¹Universidad de Sevilla, Sevilla, España

ABSTRACT

This work studies vibration and radiated noise from railway systems using the 2.5D Boundary Element Method (BEM) formulation in the Bézier-Bernstein space. The proposed method allows the representation of the exact geometry of the track as it is done in Computer-Aided Design (CAD) models. Thus, it is possible to evaluate problems with complex geometries, which are usually not adequately represented by the standard BEM and FEM formulations. Radiated noise is computed from the normal displacement at the boundary of the rail system according to the integral representation of the sound pressure. Only the track boundary is meshed, as the radiation condition is implicitly satisfied in the BEM fundamental solution. Moreover, the methodology allows the use of arbitrary high-order elements, making it efficient for the computation of radiated noise at high frequencies. The performance of the proposed method is shown by studying the mobility and the radiated noise of an 'open' rail section.

Keywords— radiated noise, railway vibration, boundary element method, bézier curve.

1. INTRODUCTION

Rolling noise arising from railway systems is mostly due to the wheel/rail roughness. The radiated noise level depends on the train speed, rail roughness, and track mobility, among others. The track response depends on the rail, rail pads, sleepers and ballast layer. Accurate estimation of radiated noise requires a proper definition of not only track properties but also the geometry of radiating surfaces. Therefore, it is important to improve the prediction capacities of the existing numerical models in order to compute the sound radiation from the different track systems, with the aim of mitigating its effects.

This work proposes a method based on the 2.5D BEM formulation in the Bézier-Bernstein space [1] to calculate

vibration and radiated noise from railway systems. This approach avoids mesh errors and enables evaluating the exact boundary geometry of complex rails sections. In addition, the representation of the field variables at nodal points instead of control variables allows an easy definition of the boundary conditions without any assumptions. The use of arbitrary high-order elements is also allowed, making it efficient for the computation of radiated noise at high frequencies.

The paper is organized as follows. First, the numerical model is presented. The 2.5D BEM formulation for elastodynamic and fluid-acoustics problems is described. The geometry and element approximations are introduced according to the Bézier-Bernstein formulation.

2. NUMERICAL MODEL

A domain Ω that comprises the track system and air medium is decomposed into different subdomains as shown in Figure 1. The subdomain decomposition corresponds to solid regions comprising the rail (Ω_{s_1}) and the rail pad (Ω_{s_2}), and the air medium (Ω_f). All of the subdomains are represented by the Boundary Element Method. Under the assumption of a longitudinally invariant problem in the z direction, the solution is obtained in the frequency-wavenumber $\omega - \kappa_z$ domain using a two-and-a-half dimensions (2.5D) formulation [1]:

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\mathbf{a}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) e^{-i\kappa_z z} d\kappa_z \quad (1)$$

where $\tilde{\mathbf{a}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)$ is the frequency-wavenumber representation of a variable of interest (e.g., displacement or sound pressure), ω is the angular frequency, $\mathbf{x} = \mathbf{x}(x, y, z)$ and $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}(x, y, 0)$. The Greek letter i denotes the unit imaginary number.

The solution of the coupled air-track system is obtained by imposing appropriate conditions at the solid-solid and

* **Corresponding author:** aro@us.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

solid-fluid interfaces. Equilibrium of forces and compatibility of displacements must be achieved at solid interfaces; and the equilibrium of normal pressure, with null shear stress, and continuity of normal displacement are imposed at the solid-fluid interface Γ_{sf} . Each subdomain is directly coupled, and the equations are assembled into a global system.

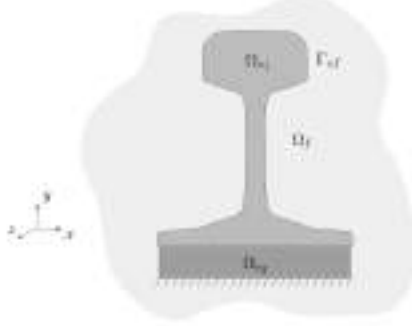


Figure 1. Boundary subdomains definition: rail (Ω_{s1}), rail pad (Ω_{s2}) and air medium (Ω_f).

2.1. Boundary element formulation in elastodynamics

Solids in track systems such as rail and rail pad are represented using the BEM formulation in elastodynamics. The integral representation of the displacement $\tilde{\mathbf{u}}_i$ for a point i , with zero body forces and zero initial conditions, may be written as [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i)\tilde{\mathbf{u}}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i, \kappa_z, \omega) \\ = \int_{\Gamma_s} \left(\tilde{\mathbf{t}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)\tilde{\mathcal{G}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \right. \\ \left. - \tilde{\mathbf{u}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)\tilde{\mathcal{H}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \right) d\Gamma(\tilde{\mathbf{x}}) \end{aligned} \quad (2)$$

where $\tilde{\mathbf{u}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)$ and $\tilde{\mathbf{t}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)$ are displacement and traction, respectively. $\tilde{\mathcal{G}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i)$ and $\tilde{\mathcal{H}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i)$ are the full-space fundamental solution to displacement and traction at the point $\tilde{\mathbf{x}}$ due to a point source acting at the collocation point $\tilde{\mathbf{x}}_i$. The integral-free term $\mathbf{c}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i)$ depends only on the boundary geometry at the collocation point $\tilde{\mathbf{x}}_i$.

The two-and-a-half-dimensional Green's function is obtained by means of the potentials \tilde{A}_p and \tilde{A}_s for the irrotational and equivoluminal parts of the displacement vector, respectively [3]:

$$\tilde{A}_p = \frac{l}{4\rho\omega^2} [H_0^{(2)}(\kappa_\alpha r) - H_0^{(2)}(-i\kappa_z r)] \quad (3)$$

$$\tilde{A}_s = \frac{l}{4\rho\omega^2} [H_0^{(2)}(\kappa_\beta r) - H_0^{(2)}(-i\kappa_z r)] \quad (4)$$

where $\kappa_\alpha = \sqrt{\kappa_p^2 - \kappa_z^2}$ and $\kappa_\beta = \sqrt{\kappa_s^2 - \kappa_z^2}$, and κ_p and κ_s represent the wavenumbers for dilatational and shear waves, respectively. $H_0^{(2)}$ is the Hankel function of the second

kind. Thus, the displacement $\tilde{\mathcal{G}}_{kl}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i)$ in the k direction at $\tilde{\mathbf{x}}$ due to a point load with acting in the l direction at $\tilde{\mathbf{x}}_i$ is obtained from:

$$\tilde{\mathcal{G}}_{kl}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) = \frac{\partial^2(\tilde{A}_p - \tilde{A}_s)}{\partial x_k \partial x_l} + \delta_{kl}\tilde{\nabla}^2\tilde{A}_s \quad (5)$$

2.2. Boundary element formulation in fluid-acoustics

The integral representation of the sound pressure in the frequency-wavenumber domain for a point $\tilde{\mathbf{x}}_i$ located at the boundary Γ_{sf} can be written as:

$$\begin{aligned} c_i(\tilde{\mathbf{x}}_i)\tilde{p}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i, \kappa_z, \omega) \\ = - \int_{\Gamma_{sf}} \left(i\rho\omega\tilde{v}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)\tilde{\Psi}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \right. \\ \left. + \tilde{p}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)\frac{\partial\tilde{\Psi}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i)}{\partial\mathbf{n}} \right) d\Gamma\tilde{\mathbf{x}} \end{aligned} \quad (6)$$

where $\tilde{p}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)$ and $\tilde{v}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega)$ are the sound pressure and the particle normal velocity at the boundary Γ_{sf} , respectively. $\tilde{\Psi}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i)$ represents the velocity potential at point $\tilde{\mathbf{x}}$ due to a point source located at $\tilde{\mathbf{x}}_i$:

$$\tilde{\Psi}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) = -\frac{l}{4}H_0^{(2)}(\kappa_f r) \quad (7)$$

where $\kappa_f = \sqrt{(\omega/c_f)^2 - \kappa_z^2}$ is the fluid wavenumber and c_f is the sound propagation velocity.

2.3. Geometry and element approximation

The BEM formulations presented in previous sections are implemented in the Bézier-Bernstein space [1]. The Bézier-Bernstein formulation of the BEM allows for a geometry-independent field approximation. The proposed method is geometrically exact, based on Computer Aided Design (CAD), but field variables are independently approximated from the geometry. We use the Bézier-Bernstein form of a polynomial as an approximation basis to represent both geometry and field variables. The application of Bernstein polynomials for the representation of a Bézier curve $r_n(t)$ is:

$$r_n(t) = \sum_{k=0}^n \mathbf{b}_k B_k^n(t) \quad (8)$$

where \mathbf{b}_k are the control points used to approximate the geometry and n is the curve degree. An efficient curve computation is achieved using the polar form (or blossom) of a Bézier curve $r_n(t)$, which defines a multiaffine transformation satisfying:

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{R}(\underbrace{0, \dots, 0}_{n-k}, \underbrace{1, \dots, 1}_k) \quad (9)$$

where $\mathbf{R}(t_1, \dots, t_n)$ is computed as:

$$\mathbf{R}(t_1, \dots, t_n) = \sum_{I \cup J = \{1, 2, \dots, n\}} \prod_{i \in I} (1 - t_i) \prod_{j \in J} t_j \mathbf{b}_{|J|} \quad (10)$$

Thus, a Bernstein polynomial can be formulated in polar form substituting Equation (9) into Equation (8) as follows:

$$r_n(t) = \sum_{k=0}^n \mathbf{R} \left(\underbrace{0, \dots, 0}_{n-k}, \underbrace{1, \dots, 1}_k \right) B_k^n(t) \mathbf{R}(t, \dots, t) \quad (11)$$

The Bézier-Bernstein space is used to describe the exact element geometry as $\Gamma^j(\mathbf{x}) = \mathbf{r}_n^j(t)$. Hence, the element integrals can be written on an univariate basis $t \in [0, 1]$ as [1]:

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma^j} f(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) d\Gamma \\ &= \int_0^1 f(\tilde{\mathbf{x}}(t), \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \left| \frac{d\mathbf{r}_n^j}{dt} \right| dt \end{aligned} \quad (12)$$

where $f(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i)$ represents the integration kernel.

The BEM formulation in the Bézier-Bernstein space employs the Lagrange interpolant relative to the Bernstein basis for the field variable approximation to an element. The field approximation given by the shape function interpolates $(n + 1)$ nodal values through the element shape functions ϕ^i of order n , for $i = 0, \dots, n$. Then, the field approximation becomes:

$$\begin{aligned} a(t) &= \sum_{i=0}^p \phi^i(t) a^i \\ &= \sum_{i=0}^p \left\{ \sum_{k=0}^n c_k^i B_k^n(t) \right\} a^i \\ &= \sum_{i=0}^p R^i(t, \dots, t) a^i, \end{aligned} \quad (13)$$

where the evaluation of the element shape function $\phi^i(t)$ also benefits from the computational advantages of using the polar form $R^i(t_1, \dots, t_n)$ according to Equation (10).

Once the geometry and the field approximation given by Equations (11) and (13) are introduced into the boundary integral equation of each subdomain, the integrals can be computed using a standard Gauss-Legendre quadrature with $(p + 1)$ integration points whenever the collocation point is sufficiently distant from the integration element. Otherwise, the solution of singular or weakly singular integrals is numerically computed using the quadrature rule proposed in References [1, 4].

Then, Equations (2) and (6) are rewritten as follows:

$$\begin{aligned} & \tilde{\mathbf{H}}_s(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \tilde{\mathbf{u}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) \\ &= \tilde{\mathbf{G}}_s(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \tilde{\mathbf{f}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \tilde{\mathbf{H}}_f(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \tilde{\mathbf{p}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) \\ &= \tilde{\mathbf{G}}_f(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \tilde{\mathbf{v}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) \end{aligned} \quad (15)$$

where $\tilde{\mathbf{H}}_s$, $\tilde{\mathbf{G}}_s$, $\tilde{\mathbf{H}}_f$ and $\tilde{\mathbf{G}}_f$ are the fully non-symmetrical boundary element system matrices for solids and acoustic subdomains, respectively.

2.1. Subdomains coupling procedure

Solid subdomains such as rail and rail pads are coupled imposing equilibrium of forces and compatibility of displacements at solid interfaces. Equilibrium of forces at the interface is fulfilled integrating nodal tractions according to the element shape function $\mathbf{N} = [\phi_0, \dots, \phi_p]$:

$$\tilde{\mathbf{f}} = \int_{\Gamma_s} \mathbf{N}^T \tilde{\mathbf{t}} \mathbf{N} d\Gamma = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{t}} \quad (16)$$

Substituting Equation (16) into Equation (14) yields the following.

$$\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{T} \tilde{\mathbf{G}}_s^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_s \tilde{\mathbf{u}} \quad (17)$$

Then the coupled system for solid subdomains is obtained imposing the equilibrium and compatibility conditions at the interface:

$$\tilde{\mathbf{K}}_s(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega; \tilde{\mathbf{x}}_i) \tilde{\mathbf{u}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) = \tilde{\mathbf{f}}(\tilde{\mathbf{x}}, \kappa_z, \omega) \quad (18)$$

The solid and fluid subdomains are assembled next. The coupling of Equations (15) and (18) is carried out by imposition of equilibrium and compatibility conditions of normal pressure and displacement at the interface Γ_{sf} between the track system and the air medium, and null shear stresses. These conditions are fulfilled through the following system of equations [5]:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_s & \mathbf{R}^T \\ -\tilde{\mathbf{G}}_f \mathbf{N}^T & \tilde{\mathbf{H}}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{u}} \\ \tilde{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (19)$$

where \mathbf{R} is the coupling fluid–solid matrix which relates force and pressure at the interface Γ_{sf} :

$$\tilde{\mathbf{f}} = - \int_{\Gamma_{sf}} \mathbf{N}^T \mathbf{n} c \tilde{\mathbf{p}} d\Gamma = \mathbf{R}^T \tilde{\mathbf{p}} \quad (20)$$

where \mathbf{n} is the outward normal vector at Γ_{sf} .

3. NUMERICAL EXAMPLE

In this section, the proposed method is used to study radiated noise from an open rail. A standard CEN 40E1 rail with a rail pad is considered in this example. Rail mobility and sound pressure are computed in two cases: a point load acting at i) the midpoint and ii) the edge of the rail head (see Figure 2). Displacements at the rail-pad base are constrained. The sound

pressure is obtained at a point located at a distance of 10 m horizontally and 1.5 m vertically from the center of the rail head. The problem solution is computed in the frequency range 30 – 2000 Hz for one hundred equally spaced wavenumbers κ_z in the interval from 0 to 10 rad/m.

Three subdomains are defined to represent the rail cross section and the air medium. The material properties of the rail section are summarised in Table 1, while a fluid density $\rho_f = 1.225 \text{ kg/m}^3$ and sound propagation velocity $c_f = 340 \text{ m/s}$ are considered for the air.

Table 1. Material properties of the rail section subdomains.

	Subdomain	
	Rail	Rail pad
Young's Modulus	210 [GPa]	4.8 [MPa]
Poisson's ratio	0.3	0.45
Density	7800 [kg/m ³]	10 [kg/m ³]
Damping loss factor	0.01	0.25

The boundary geometry is represented by 31 cubic Bézier patches as can be seen in Figure 2. The boundary is discretised into elements ensuring $\kappa_f h = 3$ and a nodal density per wavelength $d_\lambda = 2\pi p / \kappa_f h = 12$, where $\kappa_f = \omega / c_f$, h and p are the element length and order.

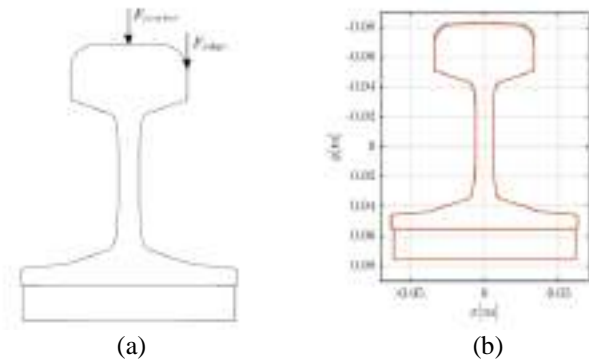


Figure 2. (a) Load positions and (b) Boundary geometry of the open rail section (red line) and the related control polygons (grey line).

Figure 3.(a) shows the rail mobility at the excitation point and the sound pressure at the observation point in the air medium. Rail mobility shows a peak around 240 Hz related to the resonance of the rail mass on the rail pad in both cases. Moreover, a second peak at higher frequency appears for edge excitation due to lateral wave propagation. These results are consistent with those obtained in Reference [6]. The maximum in the sound pressure graph appears at a frequency of 450 Hz (Figure 3.(b)).

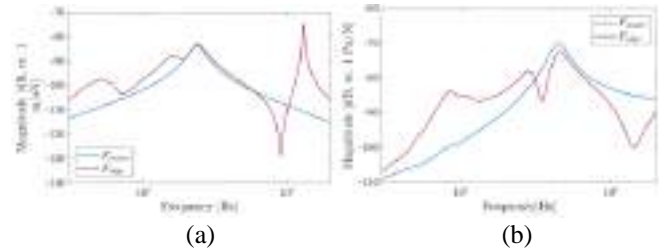


Figure 3. (a) Rail mobility and (b) sound pressure.

Finally, Figure 4 shows the radiated noise near the track system due to a load acting at the midpoint of the railhead considering a frequency of 1000 Hz.

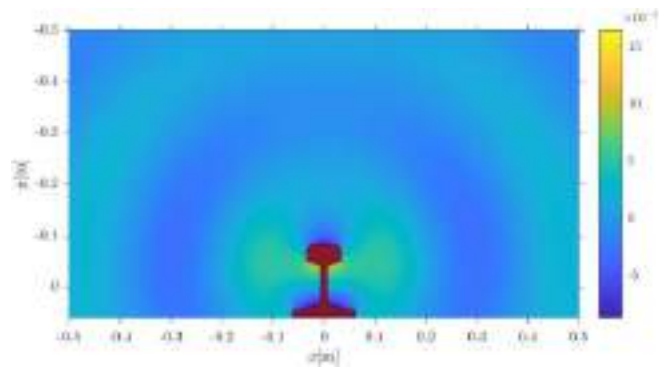


Figure 4. Radiated noise for a load acting at the midpoint of the railhead at a frequency of **1000 Hz**.

4. CONCLUSIONS

This work has proposed a 2.5D BEM formulation based on Bézier Bernstein space to study noise and vibration in railway systems. This formulation represents the exact geometry of track components that allows the analysis of complex systems commonly found on slab and urban tracks. Thus, the influence of track flexibility levels can be studied. Moreover, the proposed method is efficient for the computation of radiated noise at high frequencies since arbitrary high-order elements can be used independently of the geometry approximation. The performance of the method has been verified for an open rail section.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the financial support provided by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities under the research project PID2019-109622RB; PROYEXCEL 00659 funded by Regional Ministry of Economic Transformation, Industry, Knowledge and Universities of Andalusia; and the Andalusian Scientific Computing Centre (CICA).

6. REFERENCES

- [1] A. Romero, P. Galvín, JC . Cámara-Molina JC, A. Tadeu, “On the formulation of a BEM in the Bézier–Bernstein space for the solution of Helmholtz equation”. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 74, pp. 301-319, 2019.
- [2] A. Romero, A. Tadeu, P. Galvín, J. António, “2.5D coupled BEM–FEM used to model fluid and solid scattering wave”. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 101(2), pp. 148-164, 2015.
- [3] AJB. Tadeu, E. Kausel, “Green’s Functions for Two-and-a-Half-Dimensional Elastodynamic Problems”. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 126(10), pp. 1093-1097, 2000.
- [4] R. Velázquez-Mata, A. Romero, J. Domínguez, A. Tadeu, P. Galvín, “A novel high-performance quadrature rule for BEM formulations”. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 140, pp. 607-617, 2022.
- [5] FJ. Cruz-Muñoz, A. Romero, P. Galvín, A. Tadeu, “Acoustic waves scattered by elastic waveguides using a spectral approach with a 2.5D coupled boundary-finite element method”. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 106, pp. 47-58, 2019.
- [6] CM. Nilsson, CJC Jones, DJ. Thompson, J. Ryue, “A waveguide finite element and boundary element approach to calculating the sound radiated by railway and tram rails”. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 321(3), pp. 813-836, 2009.

AEROACOUSTICS SIMULATION OF TALGO'S RUNNING GEAR FRAME "RODAL"

Ana Vieira^{1*}, Ph.D.

¹Departamento de Innovación, Patentes Talgo SL

RESUMEN

Los trenes Talgo son fácilmente reconocibles debido a su sistema de rodadura independiente y guiada (conocido como rodal). Esta característica permite un número de soluciones difíciles de implementar en trenes tradicionales, por ejemplo, coches a nivel de andén y un sistema automático de cambio de ancho de vía. La rodadura, en cualquier vehículo ferroviario, impacta directamente el ruido de paso de un tren, debido a su contribución al ruido de rodadura y aerodinámico. Este artículo presenta una metodología computacional para el cálculo del ruido aerodinámico generado a alta-velocidad en la zona ubicada entre dos coches (paso entre coches). El cálculo del ruido aerodinámico es realizado en dos pasos: un análisis de dinámica de fluidos computacional para determinar el campo de velocidad y presión del dominio, seguido por un análisis MEF (Métodos de los Elementos Finitos) basado en la analogía de Lighthill. Los resultados son presentados para el punto de certificación de ruido de paso como definido en la *ISO EN 3095:2013*: "Measurement of noise emitted by railbound vehicles".

Palabras Clave— ferrovía, ruido aerodinámico, ruido de paso.

ABSTRACT

Talgo trains are immediately recognizable due to their single-axle running gears with independently rotating wheels (a system known as *rodal*). This characteristic type of running gear facilitates a number of solutions that are difficult to implement in conventional rolling stock, such as a coach floor at the platform level and an automatic variable gauge system. The rolling stock has a direct influence on the train pass-by noise due to its contribution both to rolling and aerodynamic noise. This paper presents a computational procedure to calculate the aerodynamic noise generated at high speed by an inter-coach gap with a *rodal*. The aerodynamic noise is calculated in two steps: a CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis to determine the velocity and pressure fields of the domain followed by a FEM (Finite Element Method) simulation of the flow-induced noise based on the

Lighthill's acoustic analogy. Results are presented for observer positions specified in the ISO EN 3095:2013: "Measurement of noise emitted by railbound vehicles".

Keywords— railway, aerodynamic noise, pass-by noise.

1. INTRODUCTION

Rail transport plays an important role in the decarbonization of the economy [1], as it has a significantly lower carbon footprint compared to other modes of transport. This great advantage, together with other benefits, such as lower operational costs and reliability, contributes to the continuous growth of the rail market [2]

The expansion of rail transport raises concerns about noise pollution, as studies have shown a direct relation between noise exposure and health issues such as high blood pressure, headache, and sleep disturbances [3].

Regulators are setting progressively more restrictive noise limits to protect communities from excessive noise levels. Mitigation measures, such as noise barriers and night curfews can be effective [4], but they are also costly. Reducing the noise source is therefore the preferable solution.

The noise produced by a passing train is a combination of rolling and aerodynamic noise, being the latter considered predominant for an operational velocity higher than 300 km/h [5].

Aerodynamic noise is generated by the interaction of an unsteady flow and a solid body. The sound power of aerodynamic noise sources increases at a rate of the 6th-8th power of the flow speed [6]. The pantograph and the inter-coach gaps are typical aerodynamic noise source in high-speed trains.

Rolling noise is generated by the interaction between the wheels and the track, depending on their roughness [7]. An irregular wheel profile and a rail surface with irregularities generate higher levels of rolling noise than even homogeneous surfaces.

Separating the aerodynamic and rolling noise contributions in a pass-by is a challenging task [8]. A typical approach

* anaelisa.alvesvieira@talgo.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

consists in combining measurements and simulations. The aerodynamic noise sources can be assessed through microphones array measurements, using beamforming techniques [9]. The software TWINS (Track Wheel Interaction Noise Software) [10] is widely used to calculate rolling noise, as the wheel and track components are usually determined using simulations.

Aerodynamic noise generation mechanisms are currently well understood due to extensive wind tunnel measurements, field measurements and simulations performed over the last 20 years of research [11]. Researchers found that the ranking of the dominant aerodynamic noise sources changes depending on the train configuration. Therefore, reducing pass-by noise requires identifying the dominant noise sources during the design phase of a new train, which is usually done through simulations, as testing scale models in a wind tunnel is expensive and not always feasible.

Talgo's unique running gear, *rodal*, impacts both aerodynamic and rolling noise. Figure 1 shows a typical running gear configuration of Talgo high-speed trains.

A *rodal* has a smaller contact surface with the track than a bogie, since it has two wheels instead of four. Consequently, a lower value of rolling noise is expected for the *rodal* than for a bogie.



Figure 1. Inter-coach gap with a *rodal*.

The turbulent flow in the inter-coach gap is also affected by the *rodal*. In a design with bogies, the wheels are under the coach, but in the *rodal* the wheels are located in-between coaches. The different location and number wheels of the running gear have an impact on the turbulent field around the inter-coach area, which means that the aerodynamic noise contribution of a *rodal* and a bogie are different.

This research work aims to simulate the aerodynamic noise generated by an inter-coach gap with a *rodal*. As to the best of the author's knowledge, this type of analysis has only been performed for inter-coach configurations with a bogie.

Aerodynamic noise can be calculated using different approaches. In the railway industry, aeroacoustic calculations are particularly challenging due to the large dimensions of a train and its components, such as the pantograph and the bogies.

In the direct noise computation (DNC) method, the aerodynamic and acoustic fields are computed simultaneously. The main advantage of this method is its accuracy, but the computational resources and the time required for the calculation [12] make this method unsuitable for the case analyzed in this work.

An alternative to the DNC method is a hybrid approach [13]. This method uses an acoustic analogy (such as the Lighthill's or the Ffowcs-Williams Hawkins analogies) to determine the noise source, using the velocity and pressure fields calculated through a computational fluid dynamics (CFD) simulation. The noise source is then propagated to far-field observer positions.

Semi-empirical methods [14] and the Stochastic Noise Generation and Radiation (SNGR) method [15] are a valid option to obtain fast estimates and to perform comparative analysis. However, those approaches are not as flexible and accurate as DNC and hybrid methods.

This research work uses a hybrid approach to calculate the aerodynamic noise generated by an inter-coach gap, combining a Large Eddy Simulation (LES) [16] with the Lighthill's analogy [17].

The CFD method applied in this work is described in Section 2, and a description of the aeroacoustic simulation is given in Section 3. Section 4 shows the obtained results and how they correlate with measurements. Finally, Section 5 summarizes the main results and conclusions of this work.

2. CFD SIMULATION

The CFD simulation was performed using Hexagon's software Cradle [18]. The mesh was generated using the voxel fitting feature of the preprocessor. This meshing approach builds a voxel mesh directly from the geometry (either CAD or faceted data) and inserts a prism-layer after the volume mesh generation. This meshing process reduces both meshing and computation time.

This work aims to simulate the aerodynamic noise generated by a middle inter-coach gap (the airflow in the first and last inter-coach gaps has a different behavior due to the influence of the head, tail, and pantograph). Analyzing the entire train is computationally demanding, and the flow conditions should therefore be approximated. In the simplified train geometry used in this work, the inter-coach is placed at a 38m distance from the head. The head is followed by a simplified clean surface until the inter-coach gap position to minimize the number of mesh elements.

These simplifications aim to approximate the airflow in a middle inter-coach gap without simulating the complete train. The presence of the head in the geometry assures a realistic transition from laminar to turbulent flow, and the clean surface between the head and the inter-coach gap approximates the mid-train airflow condition. Figure 2 shows the geometry simplifications and the inter-coach position

relative to the train head. The inter-coach gap geometry presents a high level of detail.

The volume domain used in the CFD analysis has a length of $65m$, a width of $33m$ and a height of $11m$. An auxiliary domain was created to export the CFD results to the aeroacoustic simulation. This auxiliary domain, defined in the location of the inter-coach gap, has a length of $15m$, a width of $7m$ and a height of $6.5m$.

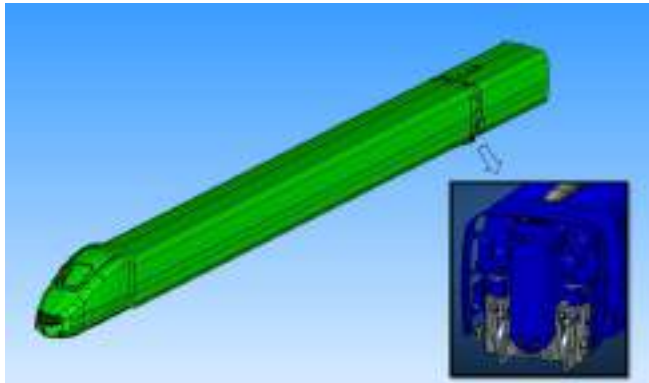


Figure 2. Geometry used to model the airflow in the inter-coach gap.

The volume mesh has 4 layers of $1cm$ elements, and the growing rate was defined as 2. This resulted in a model of $75M$ of elements. The geometry seems to be well-defined with this mesh refinement, as observed in Figure 3.

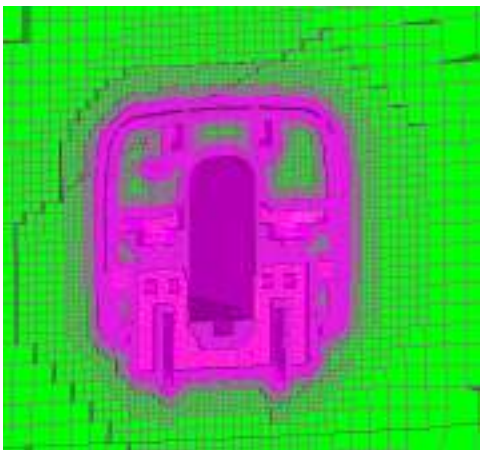


Figure 3. Mesh refinement in the inter-coach gap.

The analysis considered a train velocity of 280 km/h , i.e., the airflow can be considered as incompressible.

The initial conditions of the flow were obtained using a Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) model. Those initial conditions were then used as input in the transient analysis.

In the transient analysis, the turbulent flow was modelled using a Large Eddy Simulation (LES), with a time step of $3.75e-5$ seconds. The velocity field of the auxiliary domain

was saved every $1e-4$ seconds. The total time of the CFD analysis was 0.1 seconds.

The computational time was approximately 72 hours, in a CPU with 48 cores, 512 GB RAM and 2 processors Intel(R) Xeon(R) Gold 6248R @ 3GHz 2.99 GHz .

3. AEROACOUSTIC SIMULATION

The aeroacoustic simulation was performed using Actran [19]. The aeroacoustic sources were computed from the CFD data previously calculated with Cradle using the iCFD utility of Actran. For incompressible computation, the iCFD reads the velocity field in the time domain, averages the data, and interpolates it to the acoustic mesh in the frequency domain. The frequency range of the aeroacoustic analysis is limited to $100\text{-}1600\text{Hz}$ due to the mesh size used in the CFD analysis and the time of 0.1 seconds of the simulation.

The aeroacoustic simulation aims to determine the noise generated by the inter-coach gap and *rodal* alone. Therefore, the geometry is defined as in Figure 4, where only the inter-coach gap, the *rodal*, and a small part of the adjacent coaches are considered.

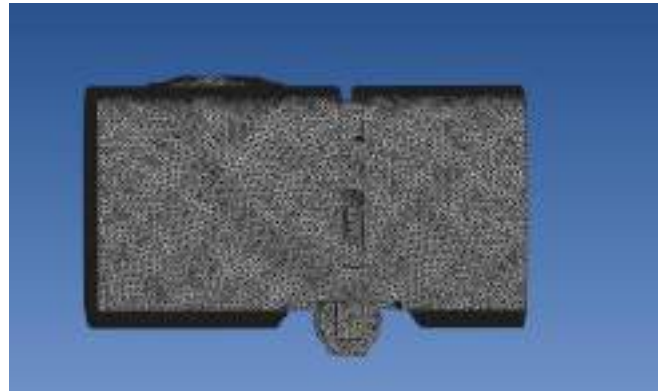


Figure 4. Geometry of the inter-coach gap used in the aeroacoustic simulation.

The mesh refinement was changed depending on the frequency range to keep a reasonable computational time. Lower frequencies can be calculated with coarser meshes than high frequencies. On the other hand, low frequencies require larger domains than high frequencies for the noise source computation. Generating different acoustic meshes depending on the target frequency is useful to limit the number of mesh elements. The acoustic mesh should be coarser than the CFD mesh to assure a valid interpolation.

The aeroacoustic field was computed using Lighthill's analogy. The calculations were based on a Finite Elements Method (FEM) formulation.

Infinite elements with a non-reflective boundary were used to propagate the noise sources to the far-field. An observer position aligned with the inter-coach gap was defined at a $7.5m$ distance and a height of $1.2m$ from the track, as defined

by the ISO EN 3095: 2013 “Measurement of noise emitted by railbound vehicles”.

The frequency resolution of the simulation was of 25 Hz. The computational time was different depending on the mesh refinement. The iCFD computation was of approximately 1h for low frequencies, increasing up to 5h for the highest frequencies. The aeroacoustic FEM computation was approximately 1h per frequency step for low frequencies, up to 5h per frequency step for the highest frequencies. The aeroacoustic simulation was performed in the same CPU as the CFD simulation.

4. RESULTS

This section shows the results obtained for the CFD and aeroacoustic simulations. Figure 5 shows the velocity field in the inter-coach gap. The highest values of velocity are located at the bottom part of the coach where there is more interaction between the airflow and the *rodal*.

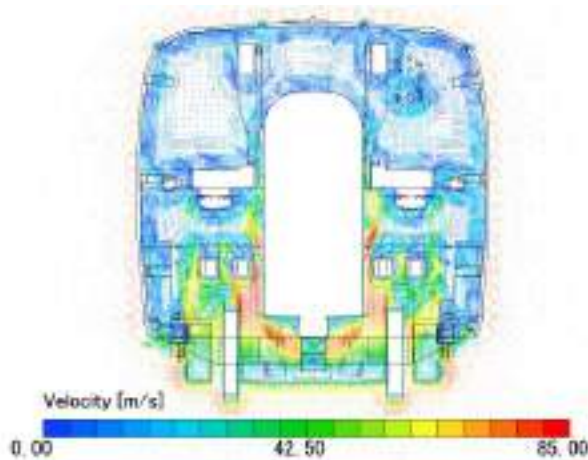


Figure 5. Velocity field calculated in the CFD analysis.

Figure 6 and Figure 7 show the aerodynamic noise contours around the inter-coach gap in dBA, at the frequency of 400 Hz.

The color scale of the noise plots is not presented for confidentiality of the results. The red and blue colors indicate maximum and minimum values, respectively. Higher levels of noise are observed close to the wheels and under the coach than in the middle of the inter-coach gap.

The noise contour at high frequencies has a similar distribution as in low frequencies, as shown in Figure 8 and Figure 9, for the frequency of 800 Hz. There are no significant noise sources generated at the top of the inter-coach gap, the highest values of noise are around the wheels and under the coach.

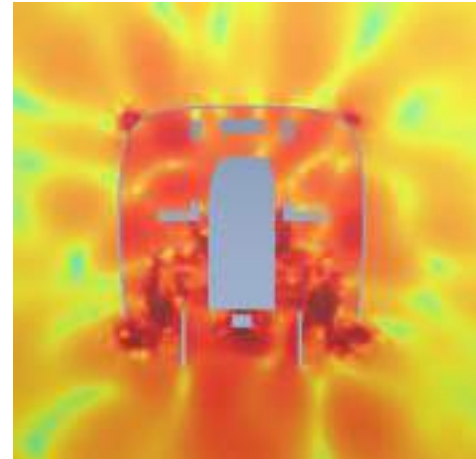


Figure 6. Aerodynamic noise generated at the inter-coach gap at the frequency of 400 Hz (front view).

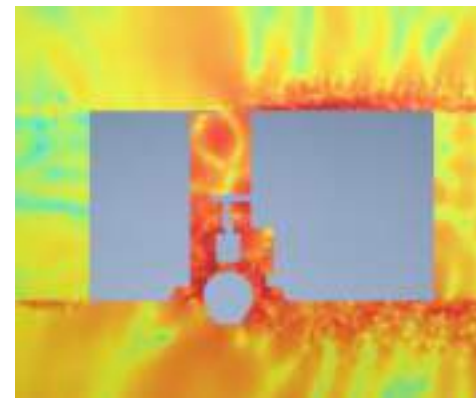


Figure 7. Aerodynamic noise generated at the inter-coach gap at the frequency of 400 Hz (side view).

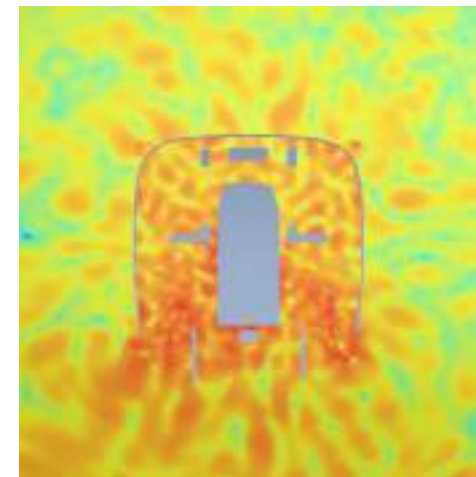


Figure 8. Aerodynamic noise generated at the inter-coach gap at the frequency of 800 Hz (front view).

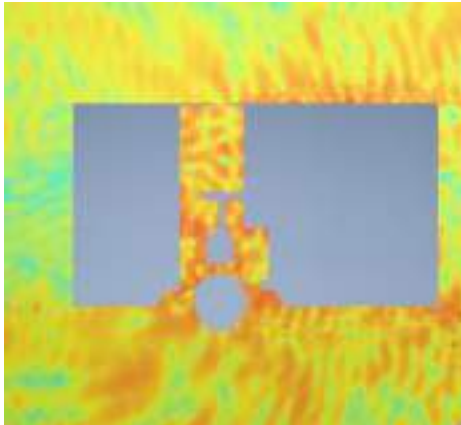


Figure 9. Aerodynamic noise generated at the inter-coach gap at the frequency of 800 Hz (side view).

Figure 10 shows the A-weighted spectrum calculated for an observer position equivalent to a pass-by certification point. The spectrum is plotted in 1/3-octave bands.

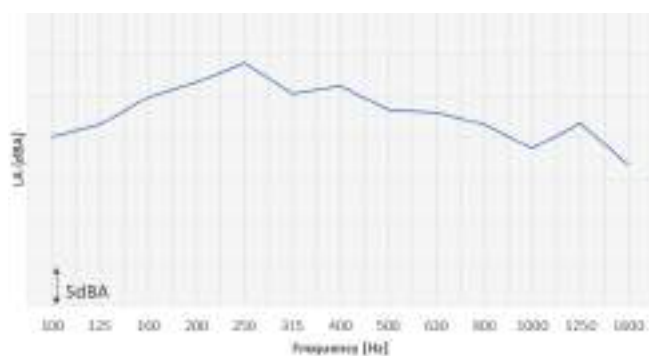


Figure 10. Normalized A-weighted noise spectrum calculated at a certification position (in 1/3-octave bands).

The spectrum is approximately constant over the mid-frequency range, showing a peak at 250 Hz. The noise level slightly decreases for frequencies higher than 1000 Hz. This decrease can indicate that the mesh used in the CFD computation should be further refined. A convergence analysis (varying the refinement of the CFD and acoustic meshes) is the best option to verify if this decrease of the spectrum at high frequencies is due to mesh parameters. However, that is not feasible in the case of the inter-coach gap due to the large computational time.

The A-weighted overall sound pressure level (OASPL) of the aerodynamic noise generated by the inter-coach gap noise was obtained from the spectrum of Figure 10 and compared with pass-by measurements of a Talgo's high-speed train at the velocity of 280 km/h. Figure 11 shows two pass-by curves measured at the high-speed track Madrid-Barcelona (black and gray curves) together with the OASPL value calculated for the aerodynamic noise generated by the inter-coach gap

(red curve). The frequency range of the experimental pass-by curve was limited to 100-1600 Hz, as in the simulation.

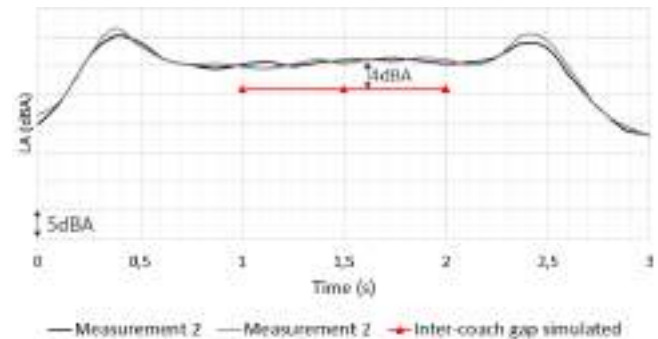


Figure 11. Normalized pass-by curves of a Talgo's high-speed train at the velocity of 280 km/h, measured at the certification point (7.5 m distance and 1.2 m height from the track) considering a 100-1600 Hz frequency range.

In this train configuration, the traction and ventilation systems are all located in the powerheads (head and tail of the train). Therefore, the maximum values of the pass-by curve, correspond to the powerheads. The noise values at the middle of the curve are a result of the aerodynamic and rolling noise generated at the inter-coach gap/rodal. All coaches have HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system units but they are negligible noise sources to the pass-by noise.

The difference of noise level between the experimental pass-by curve at the coach locations and the value calculated for the aerodynamic noise at the inter-coach gap is 4 dBA.

At the speed of 300 km/h, the contribution of the aerodynamic and rolling noise is estimated to be approximately the same according to literature [20]. This means that the aerodynamic noise contribution is expected to be 3 dBA below the total pass-by noise curve. In the case analyzed in this work, the operating velocity is slightly below 300 km/h and therefore the rolling noise contribution to total noise is expected to be slightly higher than the aerodynamic noise contribution. The OASPL value calculated for the aerodynamic noise generated by the inter-coach gap can therefore be considered realistic.

5. CONCLUSIONS

This work determined the aerodynamic noise contribution of an inter-coach gap with a *rodal* to the pass-by noise of a Talgo's high-speed train.

The computational method applied was based on a hybrid approach. The operational velocity of the train was 280 km/h, which means that the flow can be considered as incompressible. The velocity field in the inter-coach gap was calculated with a LES. This output was used in the aeroacoustic simulation to determine the noise sources, using the Lighthill's analogy. The near-field results are then propagated to the far-field (up to an observer position

equivalent to a certification point of a pass-by) using infinite elements.

The CFD results show higher velocity values around the wheels and below the coaches than in the top region of the inter-coach gap. The aeroacoustic analysis shows that those are the regions where the highest values of aerodynamic noise are generated.

The spectrum calculated at the certification point shows a peak at the 1/3-octave band of 250 Hz. The spectrum decreases slightly for higher frequencies, which can indicate that the CFD mesh needs to be further refined.

Nevertheless, the overall value (considering a frequency range of 100-1600Hz) determined for the aerodynamic noise generated at the inter-coach gap seems realistic when compared to experimental results.

Future work should focus on the accuracy of the results at high frequencies and on the comparison of the calculated spectrum with an experimental spectrum determined using noise source separation methods.

6. REFERENCES

- [1] E. Bachman, A. Tavasoli, T. A. Hatton, C. T. Maravelias, E. Haites, P. Styring, A. Aspuru-Guzik, J. MacIntosh and G. Ozin, "Rail-based direct air carbon capture," *Joule*, 2022.
- [2] R. Barcikowska and E. Wawrzyn, "Selected Sources of Research Funding in Railway Transport," *WUT Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, pp. 85-99, 2023.
- [3] A. Seidler, M. Schubert, Y. Mehrjerdian, K. Krapf, C. Popp, I. v. Kamp and J. H. Mikael Ögren, "Health effects of railway-induced vibration combined with railway noise – A systematic review with exposure-effect curves," *Environmental Research*, vol. 233, 2023.
- [4] R. Pieren, F. Georgiou, G. Squicciarini and D. Thompson, "Auralisation of combined mitigation measures in railway pass-by noise," in *InterNoise*, Glasgow, UK, 2022.
- [5] E. C. Talotte, "Aerodynamic Noise: A Critical Survey," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 231, no. 3, pp. 549-562, 2000.
- [6] F. Shi, F. Shi, X. Tian and T. Wang, "Numerical Study on Aerodynamic Noise Reduction of Pantograph," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 21, 2022.
- [7] X. Garcia-Andrés, J. Gutiérrez-Gil, J. Martínez-Casas and F. D. Denia, "Wheel shape optimization approaches to reduce railway rolling noise," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 62, p. 2555–2570, 2020.
- [8] E. Verheijen, "Using source separation techniques in measuring," in *Inter-Noise*, Prague, 2004.
- [9] E. Sarradj, C. Schulze and A. Zeibig, "Aspects of source separation in beamforming," in *BeBeC*, Berlin, 2006.
- [10] C. Talotte, "Railway source models for integration in the new European noise prediction method proposed in Harmonoise," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293, p. 975–985, 2006.
- [11] X.-M. Tan, H.-f. Liu, Z.-G. Yang, J. Zhang, Z.-g. Wang and Y.-w. Wu, "Characteristics and Mechanism Analysis of Aerodynamic Noise Sources for High-Speed Train in Tunnel," *Complexity*, 2018.
- [12] J. Friedrich and M. Schafer, "Acoustics Simulation in the Presence of Moving Interfaces in Multiphase Flows," in *6th European Conference on Computational Mechanics*, Glasgow, 2018.
- [13] S. Schoder and M. Kaltenbacher, "Hybrid Aeroacoustic Computations: State of Art and New Achievements," *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*, vol. 27, no. 9, 2020.
- [14] E. Latorre Iglesias, D.J.Thompson and M.G.Smith, "Component-based model to predict aerodynamic noise," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 394, pp. 280-305, 2017.
- [15] B. d. Brye, A. Poulos, C. Legendre and G. Lielens, "A cost-effective computational technique for aeroacoustic," in *ISMA 2020 Conference*, 2020.
- [16] J. Ferziger, "Large Eddy Simulation: An Introduction and Perspective," in *New Tools in Turbulence Modelling. Centre de Physique des Houches*, Berlin, 1997.
- [17] S. Caro, P. Ploumhans and X. Gallez, "Implementation of Lighthill's Acoustic Analogy in a Finite/Infinite Elements Framework," in *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Belgium, 2004.
- [18] HEXAGON, "Cradle CFD Version 2021 Release Notes," 2021.
- [19] HEXAGON, "Actran 2022 - User's Guide ActranVI," 2022.
- [20] E. Masson, N. Paradot and E. Allain, "The Numerical Prediction of the Aerodynamic Noise of the TGV POS High-Speed Train Power Car," in *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, 2012.



LA ENTROPÍA SHANNON APLICADA A LA ACÚSTICA: ESTUDIO DEL EFECTO ZENER ACÚSTICO

José Sánchez-Dehesa^{1*}
J. Ricardo Arias-González²

¹Grupo de Fenómenos Ondulatorios, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n (Edificio 7F), 46022 Valencia, España

²Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n, 46022 Valencia, España

RESUMEN

Este trabajo introduce en acústica una fórmula inspirada en la entropía Shannon comúnmente usada en la teoría de información. Se demuestra que la llamada entropía Shannon acústica es una herramienta muy útil para caracterizar la localización de los modos acústicos. En particular, la entropía Shannon acústica se aplica aquí para estudiar el efecto Zener acústico, que fue caracterizado experimentalmente en redes de cavidades acústicas con gradiente de anchura: Se observa que los modos acústicos involucrados en la resonancia Zener acústica maximizan el valor de la entropía Shannon cuando el gradiente de anchura alcanza el valor crítico donde los dos niveles acústicos se anti-cruzan. En consecuencia, se concluye que la aparición del efecto Zener acústico está asociado con la máxima deslocalización de dos modos acústicos acoplados.

ABSTRACT

We introduce Shannon entropy as a tool to characterize the spreading of acoustic modes. Here, it is employed to study the acoustic analog of the resonant Zener tunneling observed in graded acoustic superlattices. It is shown that the two acoustic levels involved in the phenomenon maximize their Shannon entropy at the critical gradient where the levels anticross.

Palabras Clave— Entropía Shannon. Modos acústicos. Localización acústica. Efecto Zener acústico.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su introducción en teoría de la información [1], la entropía Shannon ha sido aplicada a una gran variedad de

campos. Así, por ejemplo, ha abierto nuevas vías para la interpretación de fenómenos bien conocidos en cristalografía y física atómica [2]. Este trabajo introduce en acústica una fórmula de la entropía Shannon que permite describir efectos acústicos donde la localización de los modos acústicos juegue un rol fundamental. En la literatura científica ya existen varios indicadores para caracterizar el grado de localización de modos acústicos, entre otros, el denominado “inverse participation ratio” (IPR) [3]. Aquí, sin embargo, proponemos que la fórmula de la entropía Shannon, convenientemente adaptada a la acústica, es la mejor opción para la caracterización de modos acústicos ya que la entropía Shannon es un concepto universal, que enlaza la teoría de la información y la complejidad de los fenómenos ondulatorios con virtualmente cualquier disciplina científica. En particular, este trabajo describe cómo utilizar la entropía Shannon acústica en el estudio de la dinámica del efecto Zener acústico, que tiene lugar en redes de cavidades acústicas con gradiente de anchura [4]. El análisis se basa en el análisis detallado del cruce evitado que experimentan los niveles acústicos que pertenecen a mini bandas vecinas en el sistema de multicapas que forman las superredes acústicas. A continuación, en la Sección 2 introducimos la fórmula para la entropía Shannon adaptada a la acústica. Posteriormente, en la Sección 3, aplicamos la fórmula de Shannon acústica a una estructura periódica de cavidades de agua rodeadas de un metamaterial acústico, que muestra un comportamiento similar a la estructura caracterizada experimentalmente en Ref. [4]. Finalmente, la Sección 4 dará un resumen de las conclusiones.

2. LA ENTROPÍA SHANNON EN ACÚSTICA

* **Autor de contacto:** jsdehesa@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

En física atómica, la entropía Shannon ha sido definida como [2]: $S_\rho = -\int \rho(\mathbf{r}) \ln \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$, donde $\rho(\mathbf{r}) = |\psi(\mathbf{r})|^2$ es la densidad de probabilidad asociado a un orbital electrónico con función de onda $\psi(\mathbf{r})$. Para campos clásicos (por ejemplo, en electromagnetismo o en acústica), sin embargo, no existe una magnitud equivalente que tenga el significado de una distribución de probabilidad. Para evitar éste inconveniente, hemos explotado la analogía entre orbitales electrónicos mecano-cuánticos y modos acústicos confinados en cavidades acústicas de cualquier tipo. Por ejemplo, láminas de un material sólido en aire pueden sustentar vibraciones acústicas que pueden ser consideradas como los modos de la ecuación de onda asociada sujeta a las condiciones de contorno en las interfaces con el medio que les rodea. Estos modos tienen una cierta vida media y pueden ser considerados como el análogo clásico de los orbitales atómicos. Partiendo de ésta analogía con las estructuras atómicas, hemos introducido la siguiente distribución de probabilidad [5].

$$P(\mathbf{r}) = |u(\mathbf{r})|^2 / \int |u(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}, \quad (1)$$

donde $u(\mathbf{r})$ representa el campo de desplazamientos de las partículas, que va a jugar el mismo papel en acústica que la distribución de probabilidad en el sistema mecano-cuántico. De todas formas, puede extenderse al campo de velocidades de las partículas o la presión acústica para definir la correspondiente $P(\mathbf{r})$, ya que son magnitudes relacionadas en acústica lineal. Por tanto, la entropía Shannon acústica se define como:

$$S_u = - \int P(\mathbf{r}) \ln P(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (2)$$

El valor de S_u proporciona información del esparcimiento espacial del nivel acústico representado por $u(\mathbf{r})$, dando la incertidumbre de su localización espacial. Esta cantidad se comporta como la entropía Shannon en la teoría de información; esto es, S_u aumenta cuando crece la incertidumbre (i.e., cuando el nivel acústico se vuelve más deslocalizado).

3. APLICACIÓN AL ESTUDIO DEL EFECTO ZENER ACÚSTICO

Las estructuras que estudiamos están descritas esquemáticamente en la Figura 1 y consisten en una multicapa de m cavidades de agua acopladas, W_m , encerradas por $m + 1$ láminas fluidas de igual anchura, A_m . Además, consideramos que las láminas están hechas de un metamaterial acústico (un cristal de sonido) con parámetros homogenizados ρ_A and c_A , respectivamente, densidad de masa y velocidad del sonido. Una estructura análoga realizada con cavidades de agua rodeadas por láminas de Plexiglás ha sido empleada para observar las oscilaciones Bloch acústicas y el tunneling Zener (ZT) resonante [4].

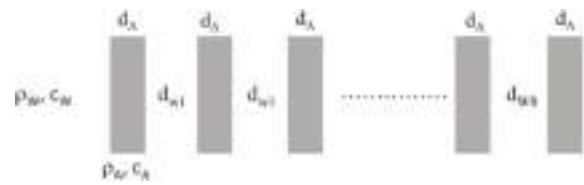


Figura 1 Esquema de la estructura multicapa considerada en este estudio, consistente en ocho cavidades, W_m , con anchuras variables separadas por nueve cristales de sonido homogenizados con igual anchuras d_A embebidas en un fluido con parámetros ρ_w and c_w .

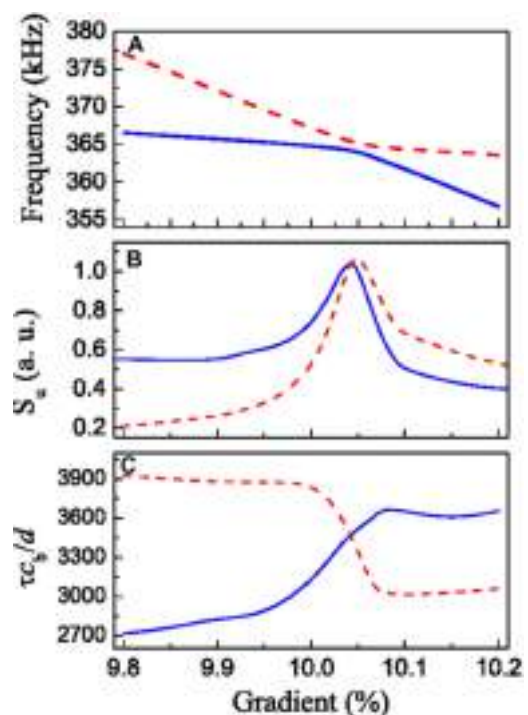


Figura 2 Frecuencia (A), entropía Shannon acústica (B), y vida media (C) de los dos modos acústicos, u_1 , and u_2 , que interactúan en la región cercana al cruce evitado para la estructura descrita en la Figura 1

Para observar el efecto ZT resonante hay que romper la simetría de traslación introduciendo un gradiente $\Delta(1/d_w)$ en las anchuras, d_w , de las cavidades de agua. Figura 2 representa las frecuencias y el valor de las entropías Shannon acústicas de los niveles acústicos involucrados en el cruce evitado, una característica del efecto ZT. Por una parte, la Fig. 2A muestra que la frecuencia u_2 (línea roja a trazos) es siempre más alta que la del modo u_1 (línea azul continua), aunque ambas frecuencias se aproximan cerca del valor crítico del gradiente donde los niveles muestran un cruce evitado. Por otra parte, la Fig. 2B muestra que los valores de

la entropía de los modos exhiben un comportamiento diferente, que está fuertemente correlacionado con el valor del gradiente. Para valores pequeños del gradiente (i.e., para valores mucho más bajos que el crítico), la entropía S_{u_2} es más pequeña que S_{u_1} . Este comportamiento indica que el sonido en el modo u_2 está más localizado que en u_1 . A medida que el valor del gradiente aumenta, ambos modos se comportan de forma similar, aumentando sus entropías hasta que en la región entre 10.02% and 10.06%, donde los modos se mezclan fuertemente y la pendiente de la entropía cambia abruptamente de valores positivos a negativos cuando el gradiente alcanza el valor crítico (10.04%).

La explicación dada arriba viene apoyada por la Figura 2C, que muestra los valores calculados de la vida media τ (en unidades reducidas) de los modos acústicos. Efectivamente, por debajo del gradiente crítico, el modo u_2 tiene vida media superior al de modo u_1 , lo que indica mayor localización. Para el gradiente crítico ambos modos tienen el mismo valor de τ y por encima del gradiente crítico, el estado de localización de los modos cambia, siendo ahora el modo u_2 el que pasa a estar menos localizado.

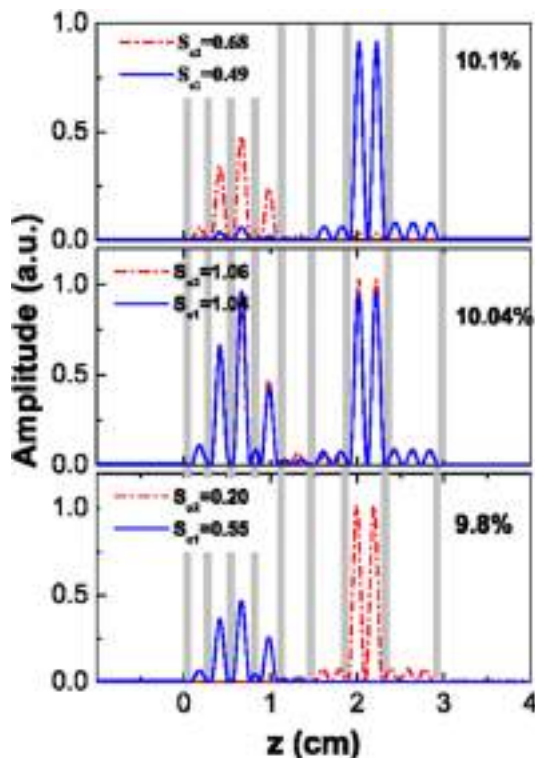


Figura 3 Amplitud (en unidades arbitrarias) de los modos acústicos u_1 (línea azul continua) y u_2 (línea roja a trazos) calculados para tres valores del gradiente de anchuras. El valor 10.04% corresponde al valor del gradiente crítico donde aparece el cruce evitado de los modos.

Los resultados anteriores respecto a la localización de los modos son corroborados por la representación de las amplitudes de los modos que se dan en la Fig. 3. El panel central de la Fig. 3 muestra la amplitud de los modos para el gradiente crítico (10.04%), donde los modos resultantes son una combinación enlazante y anti-enlazante de los modos no interactuantes. Como consecuencia, los respectivos campos de desplazamiento (i.e., las funciones de onda en términos mecano-cuánticos), muestran máxima dispersión y las entropías Shannon acústicas alcanzan valores máximos. Para el gradiente 10.1% (panel superior) el nivel u_2 está más localizado en las cavidades inferiores, mientras para el gradiente 9.8% (panel inferior) el modo u_2 se localiza en las cavidades a la derecha donde el valor de la entropía es inferior.

4. CONCLUSIÓN

En este trabajo hemos introducido la fórmula para la entropía Shannon en acústica. Mediante su aplicación al estudio del efecto Zener resonante, hemos comprobado que el cálculo de dicha la fórmula proporciona una información muy útil para caracterizar el grado de localización de los modos acústicos involucrados en el efecto Zener. En particular, hemos concluido que el estado de localización de los modos cambia al atravesar el gradiente crítico donde ambos modos alcanzan su mayor grado de deslocalización.

En resumen, dada la universalidad de la fórmula de Shannon [1], sugerimos que la entropía Shannon acústica sea usada como herramienta preferida de cara a la caracterización del grado de localización de modos acústicos en estructuras acústicas.

Trabajo subvencionado por el contrato PID2020-112759GB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

5. REFERENCIAS

- [1] C. E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell Syst Tech J* **27**, 379–656 (1948).
- [2] R. González-Férez, J. S. Dehesa. Shannon entropy as an indicator of atomic avoided crossings in strong parallel magnetic and electric fields. *Phys Rev Lett.* **91**, 11301 (2003).
- [3] D. J. Thouless. Electrons in disordered systems and the theory of localization. *Phys Rep* **13**, 93-142 (1974).
- [4] H. Sanchis-Alepuz, Y. A. Kosevich, J. Sánchez-Dehesa. Acoustic analog of electronic Bloch oscillations and resonant Zener tunneling in ultrasonic superlattices. *Phys Rev. Lett.* **98**, 134301 (2007).
- [5] J. Sánchez-Dehesa and R. Arias-González. Characterization of avoided crossings in acoustic superlattices: The Shannon entropy in acoustics. *Front. Phys.* **10**, 971171 (2022).

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EFECTO DEL AMORTIGUAMIENTO DE LA MEMBRANA TIMPÁNICA HUMANA SOBRE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL OÍDO MEDIO

Luis Caminos^{1*}

Antonia Lima-Rodriguez¹

José García-Manrique¹

Antonio Gonzalez-Herrera¹

¹Departamento de ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. Universidad de Málaga. España

RESUMEN

Los Modelos en Elementos Finitos (MEF) son ampliamente usados para estudiar y comprender el comportamiento del sistema auditivo humano. La membrana timpánica (MT), cumple un rol fundamental en la transmisión de sonido ya que transforma la energía acústica proveniente del canal auditivo, en energía mecánica vibracional que transmite a la cadena osicular y luego es conducida al interior de la cóclea para finalmente convertirse en una señal eléctrica en el cerebro que se interpreta como un sonido. La vibración de la MT condiciona la eficiencia en la transmisión de sonido y depende de su forma geométrica, distribución de la masa, rigidez, amortiguamiento y condiciones de contorno como la presión de sonido y restricciones de desplazamiento. En el rango de frecuencias audibles, el amortiguamiento juega un papel fundamental. No existe consenso en el tipo de amortiguamiento utilizado en los modelos de la literatura especializada; las propuestas más comunes son el amortiguamiento de Rayleigh y modelos viscoelásticos. Esta investigación pretende estudiar el efecto de ambos. Para tal fin se hace un análisis armónico a un MEF del oído medio y se calcula la función de transferencia con cada modelo. Finalmente, los resultados se contrastan con valores experimentales tomados de la literatura.

ABSTRACT

Finite Element Models (FEM) are widely used to study and understand the behavior of the human auditory system. The tympanic membrane (TM) plays a fundamental role in the transmission of sound since it transforms the acoustic energy traveling the ear canal into mechanical vibrational energy transmitted to the ossicular chain and is then conducted into the cochlea to finally become an electrical signal in the brain that is interpreted as a sound. The vibration of the MT determines the efficiency of sound transmission and depends on its geometric shape, mass distribution, stiffness, damping and boundary conditions such as sound pressure and

displacement restrictions. In the audible frequency range, damping plays a fundamental role. There is no consensus on the type of damping used in the models in the specialized literature; The most common proposals are Rayleigh damping and viscoelastic models. This research aims to study the effect of both. For this purpose, a harmonic analysis is carried out using MEF of the middle ear and the transfer function is calculated with each model. Finally, the results are contrasted with experimental values taken from the literature.

Palabras Clave— Elementos Finitos, Membrana timpánica, amortiguamiento.

1. INTRODUCCIÓN

Los MEF del oído humano son una herramienta fundamental para comprender el funcionamiento de este complejo sistema. Estos modelos permiten desarrollar diversos estudios (estáticos y dinámicos) sobre geometrías muy cercanas a las reales. Sin embargo, para poder desarrollar los cálculos numéricos es fundamental conocer no solo la geometría sino también los parámetros que definen los modelos de comportamiento de los materiales de cada componente.

En los tejidos vivos, es complejo medir experimentalmente dichos parámetros. Esta tarea se realiza en la mayoría de los casos a través de métodos de calibración de modelos numéricos, sobre la base de una respuesta conocida, como es el caso de desplazamientos, velocidades o aceleraciones de algún punto del sistema, medidas bajo ciertas condiciones, utilizando oídos reales. Dentro de la literatura especializada existe cierto consenso sobre los modelos y parámetros que definen algunos de estos materiales. Sin embargo, todavía existe mucha incertidumbre en algunos aspectos como es el caso del amortiguamiento.

Por otra parte, es bien conocido la gran influencia que tiene la MT en la eficiencia de transmisión de sonido desde el canal auditivo hasta la cóclea. Una forma de medir dicha eficiencia es a través de la función de transferencia del umbo y se calcula dividiendo la velocidad compleja del umbo (dada

* **Autor de contacto:** lfcaminos@uma.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

por su módulo y ángulo de fase), por la presión de sonido aplicada a la membrana timpánica. Esta magnitud tiene unidades de m/s/Pa.

Esta investigación pretende mostrar la influencia del tipo de amortiguamiento sobre la función de transferencia del umbo. Para tal fin se desarrolló un modelo viscoelástico de la MT, sobre la base de los resultados de [1]. Los resultados de este modelo se comparan con un modelo elástico lineal usando el amortiguamiento de Rayleigh con $\alpha = 0 \text{ s}^{-1}$ y $\beta = 0.75 \times 10^{-4} \text{ s}$ [2].

En los próximos apartados se muestra una breve descripción del modelo viscoelástico, resultados y conclusiones.

2. MODELO VISCOELÁSTICO

En este estudio, la caracterización del tejido de la MT humana, a partir de sus propiedades mecánicas dinámicas, se hace sobre la base de considerar el material isótropo y homogéneo, siguiendo un comportamiento viscoelástico análogo al modelo generalizado de Maxwell.

Este modelo estará formado por un sólido lineal estándar (SLS) conectado en paralelo con tres ramas tipo Maxwell (Figura 1), bajo la suposición de que el material presenta una distribución de tiempos de relajación en el rango de frecuencias audibles (de 20 a 20000 Hz).

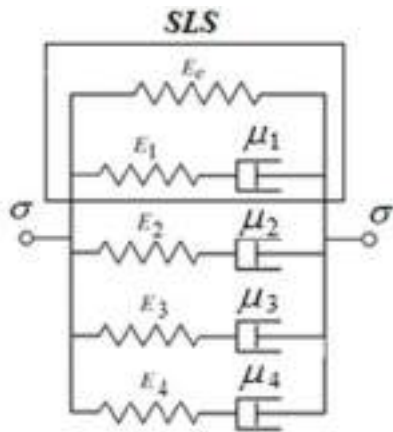


Figura 1. Modelo viscoelástico (SLS). El modelo requiere de 9 constantes.

El módulo complejo $E^*(\omega)$ en el dominio de la frecuencia se obtiene de la Ec. 1.

$$E^*(\omega) = \left(E_e + \sum_{j=1}^N \frac{E_j \tau_j^2 \omega^2}{1 + \tau_j^2 \omega^2} \right) + i \left(\sum_{j=1}^N \frac{E_j \tau_j \omega}{1 + \tau_j^2 \omega^2} \right) \quad (1)$$

La parte real de la Ec. 1 corresponde al módulo de almacenamiento (*storage*) E' y la parte imaginaria es el

módulo de pérdidas (*loss*) E'' mostrados en Ec. 2 y Ec. 3 respectivamente.

$$E' = E_e + \sum_{j=1}^N \frac{E_j \tau_j^2 \omega^2}{1 + \tau_j^2 \omega^2} \quad (2)$$

$$E'' = \sum_{j=1}^N \frac{E_j \tau_j \omega}{1 + \tau_j^2 \omega^2} \quad (3)$$

Donde E_e , es la rigidez del resorte del SLS; E_j y τ_j , representan los parámetros de la j ésima rama del sólido y ω la frecuencia angular de las ondas de tensión y deformación.

Los valores calculados para las 9 constantes son los siguientes: $E_e = 17.41 \text{ MPa}$; $E_1 = 7.92 \text{ MPa}$; $E_2 = 4.92 \text{ MPa}$; $E_3 = 4.36 \text{ MPa}$; $E_4 = 3.46 \text{ MPa}$; $\tau_1 = 0.00756 \times 10^{-3} \text{ s}$; $\tau_2 = 0.0582 \times 10^{-3} \text{ s}$; $\tau_3 = 0.47 \times 10^{-3} \text{ s}$; $\tau_4 = 4.79 \times 10^{-3} \text{ s}$.

El valor medio del factor de pérdidas η para todo el rango de frecuencias es 0.14 y se tomará como referencia para el modelo en elementos finitos.

3. MODELO EN ELEMENTOS FINITOS

En esta investigación se usa el MEF del oído medio humano desarrollado por [3], por lo tanto, se mencionan solo aquellos datos que se consideren relevantes para el desarrollo del trabajo.

3.1. Modelo geométrico y discretización.

El modelo geométrico utilizado por [3], se desarrolló utilizando mediciones registradas en la literatura especializada, tomadas en oídos promedios de cadáveres que no presentaban ningún tipo de patología. Este incluye la membrana timpánica, anillo timpánico, cadena osicular, ligamentos y tendones suspensorios.

Posteriormente dicho modelo se discretiza a través del programa de elementos finitos ANSYS, empleando los tipos de elementos como una función directa de la geometría y de las suposiciones que se toman respecto a las leyes que rigen el comportamiento dinámico de los materiales involucrados en la presente investigación.

Para la MT y anillo timpánico se usan elementos triangulares tipo SHELL181, asumiendo espesores uniformes de 0.075 mm y 0.2 mm respectivamente. Por lo tanto en esta investigación no se tomará en cuenta la variación del espesor de la membrana timpánica. Para toda la cadena osicular incluyendo el manubrio del martillo se emplean elementos tetraédricos SOLID185, de cuatro nodos y seis grados de libertad en cada nodo; este mismo se aplica para modelar las articulaciones incudomaleolar e incudoestapedial, así como el ligamento posterior del yunque y el tendón del estribo.

El tendón del tensor del tímpano y los ligamentos anterior, lateral y superior del martillo, se modelan como elementos lineales tipo viga con seis grados de libertad en cada nodo (BEAM188). Finalmente el ligamento anular del estribo se supone como una banda elástica alrededor de la placa podal de 0.1 mm de ancho y 0.1 mm de espesor utilizando elementos SHELL181. La Figura 2 muestra el modelo geométrico discretizado, señalando sus partes componentes.

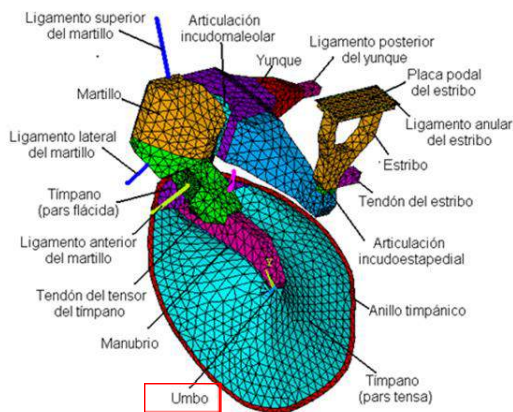


Figura 2. Modelo discretizado del oído medio humano.

Las propiedades mecánicas de las partes del modelo, con excepción del módulo de Young de la membrana timpánica, se toman de los valores medios comúnmente aceptados en la literatura, tal y como se muestra Tabla 1. La mayor parte de la información procede de la calibración de modelos numéricos.

Con el fin de simplificar las simulaciones, se usará el mismo factor de amortiguamiento calculado para la membrana timpánica ($\eta = 0.14$), en todos los elementos que están formados por tejido blando (ligamentos, tendones y articulaciones).

En el caso del modelo lineal elástico se usará un módulo de Young para la pars tensa y flácida de 32 y 10 MPa respectivamente.

3.2. Condiciones de contorno.

Los ligamentos y tendones que sirven de soporte a la cadena osicular se unen a los huesos correspondientes en uno de sus extremos a través de nodos comunes sin restricciones impuestas. Los nodos del otro extremo se fijan completamente (restricción total), simulando la conexión con el hueso de la cavidad timpánica. De manera similar el anillo timpánico se restringe completamente de movimiento, fijando los nodos del contorno exterior.

El efecto de la onda de sonido se cuantifica como una carga de presión aplicada directamente sobre la cara externa de la MT. Para el análisis armónico, los resultados se

estudiarán a un nivel de presión de sonido de 90 dB, el cual corresponde a un módulo de presión de 0.632 Pa.

Tabla 1. Propiedades de los materiales que componen el modelo en elementos finitos.

Componente	Densidad ρ (Kg/m ³)	Módulo de Young E (N/m ²)	Módulo de Poisson ν	Factor de pérdidas η (De 0.02 a 20 kHz)
Membrana timpánica: Pars tensa Pars flácida	1.2x10 ³ [4] 1.2x10 ³ [4]	Modelo Viscoelást. [18.3 - 33.8]x10 ⁶ [18.3 - 33.8]x10 ⁶ Valores entre: 0.020 y 20 kHz	0.3 ^d 0.3 ^d	0.14 0.14
Martillo	1.9x10 ³ [5]	1.41x10 ¹⁰ [8]	0.3 [7]	0
Yunque	1.9x10 ³ [5]	1.41x10 ¹⁰ [8]	0.3 [7]	0
Estribo	1.9x10 ³ [5]	1.41x10 ¹⁰ [8]	0.3 [7]	0
Anillo timpánico	1.2x10 ³ (supuesto)	6x10 ⁵ [7]	0.3 [7]	0.14
Manubrio	1.0x10 ³ [6]	4.7x10 ⁹ [6]	0.3 [7]	0.14
Tendón tensor del tímpano	2.5x10 ³ [6]	2.6x10 ⁶ [6]	0.3 [7]	0.14
Ligamento lateral del martillo	2.5x10 ³ [6]	6.7x10 ⁴ [7]	0.3 [7]	0.14
Ligamento anterior del martillo	2.5x10 ³ [6]	2.1x10 ⁶ [7]	0.3 [7]	0.14
Ligamento superior del martillo	2.5x10 ³ [6]	4.9x10 ⁴ [7]	0.3 [7]	0.14
Ligamento posterior del yunque	2.5x10 ³ [6]	6.5x10 ⁶ [9]	0.3 [7]	0.14
Tendón del estribo	2.5x10 ³ [6]	5.2x10 ⁵ [6]	0.3 [7]	0.14
Ligamento anular del estribo	2.5x10 ³ [6]	2x10 ⁵ [10]	0.3 [7]	0.14
Articulación Incudomaleolar	3.2x10 ³ [7]	1.41x10 ¹⁰ [7]	0.3 [7]	0.14
Articulación Incudoestapedia	1.2x10 ³ [7]	6x10 ⁵ [11]	0.3 [7]	0.14

La carga coclear se construye sobre la base de sustituir la impedancia acústica de la cóclea, por una impedancia mecánica equivalente como se indica en [3].

3.3. Ecuaciones gobernantes.

A continuación, se describen las ecuaciones que modelan los dos enfoques que se analizan en el presente trabajo.

En el modelado numérico de la MT, el amortiguamiento de Rayleigh es un clásico y probablemente el método más común para construir fácilmente la matriz de amortiguamiento $[C]$ de la forma:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4)$$

Donde $[C]$, $[M]$ y $[K]$ son las matrices de amortiguamiento, masa y rigidez de la estructura respectivamente. Las constantes α y β dependen del material y como es bien conocido se pueden determinar experimentalmente; sin embargo, en el caso de los modelos numéricos de la MT y demás componentes del oído medio, estas constantes se han determinado a través de la calibración de los propios modelos. En esta investigación para un modelo lineal elástico de la MT, se toman los valores calculados por [2], $\alpha = 0 \text{ s}^{-1}$ y $\beta = 0.75 \times 10^{-4} \text{ s}$.

En el caso del modelo viscoelástico el amortiguamiento de Rayleigh se sustituye por el amortiguamiento histerético o estructural, el cual lleva intrínseco las pérdidas por las fricciones internas del material y que se puede cuantificar por medio del factor de pérdidas η . Este factor se puede incluir en las propiedades elásticas del material a través del módulo complejo como se indica a continuación:

$$E^*(\omega) = E'(\omega)[1 + i\eta(\omega)] \quad (5)$$

Todos los elementos componentes del oído medio se tratarán utilizando la Ec. (5). La diferencia en la aplicación de dicha expresión radica en el hecho que solo aquellos elementos que conforman la MT se consideran con módulo complejo variable como función de la frecuencia (Ec. (1) y Ec. (2)), mientras que los demás elementos (ligamentos, tendones huesos y articulaciones), se suponen con módulo constante (ver Tabla 1).

Por otra parte, y como se dijo anteriormente el factor de pérdidas es constante en el rango de frecuencias a estudiar ($\eta = 0.14$), para todos los elementos que conforman el tejido suave y se toma como cero, para los elementos sólidos que constituyen la cadena osicular, lo cual es consistente con un comportamiento de sólido completamente elástico (ver Tabla 1).

En el caso viscoelástico la ecuación gobernante del movimiento del sistema para el análisis será:

$$[M]\{\ddot{u}^*\} + [C]\{\dot{u}^*\} + [K^*]\{u^*\} = \{F^*\} \quad (6)$$

donde los vectores $\{\ddot{u}^*\}$, $\{\dot{u}^*\}$ y $\{u^*\}$ son la aceleración, velocidad y desplazamiento complejo de los nodos respectivamente, el vector $\{F^*\}$ representa la fuerza armónica externa aplicada al sistema y que en este estudio en particular vendría dada por las fuerzas nodales que se generan debido a la presión de sonido armónica sobre la cara del tímpano.

La matriz $[M]$ es la matriz de masa estructural, $[K^*]$ es la matriz de rigidez compleja de la estructura, la cual se determina como:

$$[K^*] = [[K] + i[K'']] \quad (7)$$

La matriz $[K]$ se calcula usando el módulo de almacenamiento $E'(\omega)$ y $[K'']$ se determina usando la parte imaginaria del módulo complejo $E'' = E'(\omega)\eta$.

La matriz de amortiguamiento $[C]$, se genera a partir de la matriz de amortiguamiento de los elementos que se utilizan para simular la carga de la cóclea [3], tal como se indica a continuación:

$$[C] = \sum_{j=1}^n [C_j] \quad (8)$$

Donde n representa el número de elementos y $[C_j]$ es la matriz de amortiguamiento de cada elemento tipo amortiguador (carga de la cóclea).

La Ec. (6) permitirá calcular el módulo y ángulo de fase de los desplazamientos y las velocidades del nodo correspondiente al umbo (ver Figura 2). Este nodo servirá de referencia para medir la respuesta dinámica del sistema en el análisis armónico.

4. RESULTADOS

Para validar el modelo planteado, se utilizan las mediciones experimentales realizadas por [12]. En estas se usa dos huesos temporales frescos (TB1 y TB2) que no presentaban historia clínica de enfermedades otológicas. En ambos huesos fueron removidos: canal externo, cóclea, yunque, estribo, tendón tensor del tímpano, ligamento anular del estribo, ligamento posterior del yunque. Sólo se deja intacto el anillo timpánico con la MT, el martillo y el ligamento anterior del martillo.

En ambas muestras se midió la velocidad del umbo para un rango de frecuencias de 0.07 a 20 kHz, aplicando presiones de sonido sobre la superficie de la membrana de 80 a 100 dB_{SPL} y se determinó la función de transferencia.

Para poder simular este experimento a través del modelo numérico, se tomaron solo las partes involucradas. En este caso el modelo se compone de: anillo timpánico, membrana timpánica, manubrio, martillo y ligamento anterior del martillo (ver Figura 2).

Se aplicó una carga de presión armónica de 90 dB_{SPL} equivalente a 0.632 Pa, sobre la cara externa de la membrana y se procedió al análisis armónico abarcando un rango de frecuencias entre 0.1 y 20 kHz. Se calcularon los desplazamientos y velocidades complejas correspondientes al nodo ubicado en la zona del umbo y se obtuvo la función de transferencia del umbo.

Las Figuras 3 y 4 muestran las curvas experimentales y resultados de los modelos numéricos del módulo de la

función de transferencia del umbo y ángulo de fase, respectivamente.

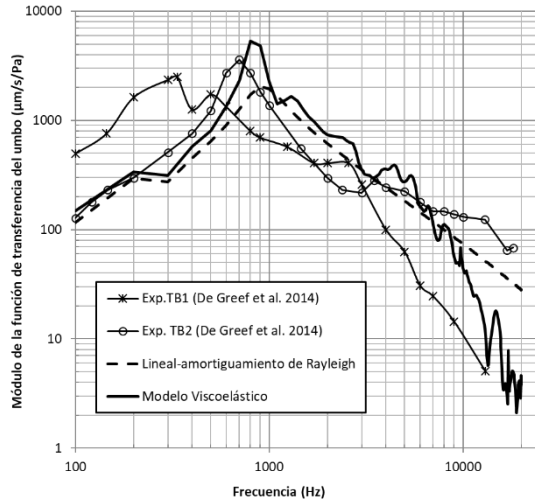


Figura 3. Módulo de la función de transferencia del umbo vs. frecuencia.

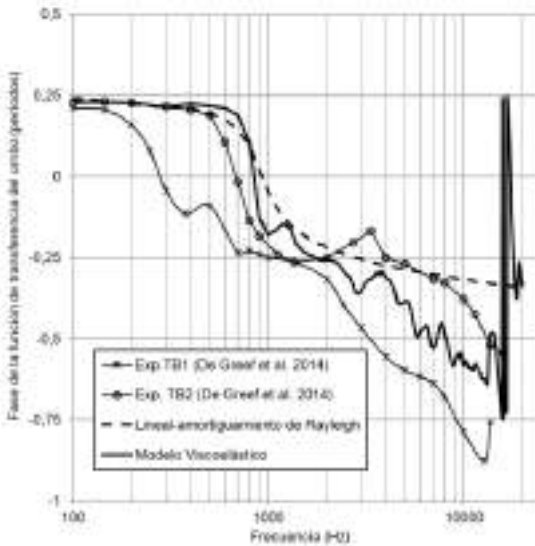


Figura 4. Fase de la función de transferencia vs frecuencia.

En cada una de las mediciones experimentales se presenta un pico característico (Cerca de 300 Hz en TB1 y 600 Hz en TB2), donde la función de transferencia alcanza una magnitud máxima y el ángulo de fase pasa por cero. Sin embargo, el pico en TB1 resulta más amortiguado con una transición más suave del ángulo de fase.

Se puede observar también que en ambas mediciones existen tres zonas de comportamiento particular a lo largo del rango de frecuencias. La primera se presenta por debajo de la frecuencia donde ocurre el primer pico; aquí el movimiento del umbo está en fase con la onda de presión. Este comportamiento se comprueba al observar que el desfase

entre la función de transferencia y la presión se mantiene en aproximadamente 0.25 periodos, lo cual es consistente con el comportamiento en fase entre la presión y el desplazamiento y a su vez es consistente con la respuesta dinámica de un oscilador mecánico simple que está dominado por su rigidez.

La segunda zona se encuentra entre la frecuencia del primer pico y los 2 a 3 kHz, donde la fase se hace más negativa por el efecto del amortiguamiento y es consistente con el aumento de la reactancia debido a la inercia del sistema. La tercera zona aparece luego de los 2 ó 3 kHz, la fase se hace más negativa superando los -0.25 períodos, lo cual implica patrones de vibración más complejos que no se pueden explicar a través de elementos mecánicos simples.

Tanto el modelo con amortiguamiento de Rayleigh y el viscoelástico presentan las tres zonas características señaladas en las curvas experimentales, sin embargo, el modelo de amortiguación viscoelástico proporciona un módulo de elasticidad complejo más ajustado a la respuesta dinámica en función de la frecuencia.

Este efecto es más notorio en alta frecuencia (> 2000 Hz), donde se puede observar el comportamiento característico oscilatorio. Con el modelo de Rayleigh, los resultados se muestran con una curva suave que va ascendiendo hasta el primer pico pero que luego comienza a descender con el aumento de la frecuencia sin captar las oscilaciones características de la membrana. Esto último se puede apreciar mejor en la variación de la fase (Figura 4), donde la transición es mucho menos pronunciada después del primer pico enmascarando el comportamiento oscilatorio.

El efecto del modelo de amortiguamiento sobre la función de transferencia del umbo, es un indicativo de cómo este puede afectar la transmisión de sonido a través del oído medio humano. Sin embargo, es importante valorar modelos de comportamiento de los demás componentes de tejido blando como ligamentos, tendones y articulaciones para comprender mejor su papel individual y en conjunto en la transmisión de sonido en general.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación, permitió caracterizar el tejido de la MT humana, sobre la base de un comportamiento viscoelástico, cuya respuesta dinámica es análoga al modelo generalizado de Maxwell, constituido por elementos mecánicos simples (resortes y amortiguadores).

Una vez definida la ecuación constitutiva del modelo, ésta se pudo implementar en un programa de elementos finitos para simular la respuesta dinámica de la MT a través de la función de transferencia del umbo.

El desarrollo de la presente investigación representa un avance importante en el estudio del comportamiento dinámico de la MT humana al incorporar valores del módulo complejo y factor de pérdidas dentro de un modelo en elementos finitos. La importancia radica en el hecho de que

los valores de estas propiedades mecánicas se originan a partir de mediciones experimentales y no a través de calibración numérica como se ha venido haciendo en el modelado del sistema auditivo; obteniendo resultados que se aproximan aún más al comportamiento real del tejido en condiciones dinámicas. La incorporación de estas propiedades también permitirá ampliar la aplicación de los modelos virtuales a otros fines como el diseño y mejora de prótesis o detección de patologías a nivel de la membrana timpánica.

[12] De Greef, D., Aernouts, J., Aerts, J., Cheng, J., Horwitz, R., Rosowski, J., Dirckx, J. Viscoelastic properties of the human tympanic membrane studied with stroboscopic holography and finite element modelling. *Hearing Research*, 312(1), 69-80, 2014.

6. REFERENCIAS

[1] Zhang X., Gan RZ. Dynamic properties of human tympanic membrane based on frequency-temperature superposition. *Ann Biomed Eng*, 41:205–214, 2013^a.

[2] Gan RZ, Sun Q., Feng B., Wood MW. Acoustic-structural coupled finite element analysis for sound transmission in human ear–pressure distributions. *Med Eng Phys*, 28:395–404, 2006.

[3] Caminos L., Garcia-Manrique J., Lima-Rodriguez A., Gonzalez-Herrera A.. Analysis of the mechanical properties of the human tympanic membrane and its influence on the dynamic behaviour of the human hearing system. *Appl Bionics Biomech*, 2018.

[4] Williams, K., Lesser, T. A finite element analysis of the natural frequencies of vibrations of human tympanic membrane. Part I. *British Journal of Audiology*, 24(5), 319-327, 1990.

[5] Weistenhöfer, C., Hudde, H. Determination of the shape and inertia properties of the human auditory ossicles. *Audiology & Neuro-Otology*, 4(3-4), 192-196, 1999.

[6] Koike, T., Wada, H., Kobayashi, T. Modeling of the human middle ear using a finite element method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(3), 1306-1317, 2002.

[7] Sun, Q., Gan, R., Chang, K., Dormer, K. Computer-integrated finite element modeling of human middle ear. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 1(2), 109-122, 2002.

[8] Speirs, A., Hotz, M., Oxland, T., Häusler, R., Nolte, L. Biomechanical properties of sterilized human auditory ossicles. *Journal of Biomechanics*, 32(5), 485-491, 1999.

[9] Gan, R., Feng, B., Sun, Q. Three-dimensional finite element modeling of human ear for sound transmission. *Annals of Biomedical Engineering*, 32(6), 847-859, 2004.

[10] Gan, R., Sun, Q., Feng, B., Wood, M. Acoustic-structural coupled finite element analysis for sound transmission in human ear-pressure distributions. *Medical Engineering & Physics*, 28(5), 395-404, 2006.

[11] Prendergast, P., Ferris, P., Rice, H., Blayney, A. Vibro-acoustic modelling of the outer and middle ear using the finite-element method. *Journal Audiology & Neuro-Otology*, 4(3-4), 185-191, 1999.

DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA LA PREDICCIÓN DEL RUIDO GENERADO EN EL LANZAMIENTO DE COHETES

Mara S. Escartí-Guillem^{1*}

Sergio Hoyas²

Luis M. Garcia-Raffi²

¹Comet Ingenieria SL, C/ Convento Carmelitas N°2, Valencia, 46010

²IUMPA, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia 46022

RESUMEN

Los motores de los cohetes que generan la potencia propulsiva necesaria para enviarlos al espacio son también la fuente del intenso entorno acústico que se produce durante el lanzamiento. Es crucial predecir y mitigar estas cargas acústicas para evitar daños y roturas del vehículo lanzador y su carga útil. La generación de ruido se atribuye a los fenómenos aeroacústicos que se producen en un chorro supersónico de alta presión y temperatura que impacta contra las superficies de la plataforma de lanzamiento. Entre ellos se incluyen el ruido debido a las ondas de choque, las turbulencias a pequeña y gran escala y las reflexiones con los conductos de escape del motor. Debido al acoplamiento entre los fenómenos acústicos y aerodinámicos, es necesario estudiar este problema con un enfoque dual. Por lo tanto, se emplea la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD) para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes en el entorno real de despegue del vehículo de lanzamiento. En consecuencia, se ha obtenido información relevante sobre todas las variables en cada punto de estudio de una forma más rentable que realizando experimentos equivalentes. El modelo generado ha predicho con éxito las ondas de choque y la propagación de las ondas acústicas. Además, se han observado las cargas acústicas generadas en el vehículo lanzador, que protegen la carga útil, como satélites o telescopios.

ABSTRACT

The rocket engines that generate the propulsive power required to send rockets into space are also the source of the intense acoustic environment produced during launch. It is crucial to predict and mitigate these acoustic loads to avoid damage and rupture of the launcher vehicle and its payload. Noise generation is attributed to aero-acoustic phenomena occurring in a high-pressure, high-temperature supersonic jet impacting the launch platform surfaces. These include noise due to shock waves, small and large-scale turbulence, and

reflections with the engine exhaust ducts. Due to the coupling between acoustic and aerodynamic phenomena, it is necessary to study this problem with a dual approach. Therefore, Computational Fluid Dynamics (CFD) technique is employed to solve the Navier-Stokes equations in the real launch vehicle's launch lift-off environment. Consequently, valuable information on all relevant variables at each study point have been obtained in a more cost-effective manner than conducting equivalent experiments. The generated model has successfully predicted shock waves and the propagation of acoustic waves. Additionally, the acoustic loads generated on the launcher vehicle, which protects the payload such as satellites or telescopes, have been observed.

Palabras Clave— Ruido, cohete, CFD

1. INTRODUCCIÓN

La potencia propulsiva necesitada para lanzar un cohete al espacio genera un intenso y complejo campo acústico [3]. Las principales fuentes de ruido durante la ignición y el despegue de un vehículo de lanzamiento espacial son los gases supersónicos de escape del motor, y sus reflexiones con la plataforma de lanzamiento[2,7]. Las ondas de presión generadas se reflejan hacia el vehículo y se transmiten a través de su estructura alcanzando la carga de pago transportada como por ejemplo satélites o personas. Estas cargas acústicas inducen vibraciones no deseadas tanto en la carga como en el vehículo que comprometen su integridad estructural [1]. Por tanto, las cargas vibro-acústicas implican una amenaza no solo a la fiabilidad del lanzador, pero también a la integridad de la plataforma de despegue. Por lo tanto, es necesario mitigar las cargas acústicas que llegan al vehículo y se transmiten a la carga útil para garantizar el funcionamiento seguro y satisfactorio de la nave espacial.

La comprensión de los fenómenos que generan cargas acústicas es de suma importancia para su mitigación. Sin embargo, realizar mediciones experimentales cercanas al

* **Autor de contacto:** mescarti@comet-ingenieria.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

chorro durante el lanzamiento resulta imposible debido a las condiciones extremas del entorno [2]. Por lo tanto, se han desarrollado diversas técnicas de predicción, incluyendo enfoques empíricos, experimentos con modelos a escala y modelos numéricos. A pesar de su amplio uso, el modelo empírico NASA SP-8072 [3], se centra en predecir la radiación de ondas Mach generadas por el chorro supersónico. Aunque se han realizado ajustes para mejorar su precisión, se pasa por alto aspectos críticos como las reflexiones en la plataforma que los convierten en inadecuados para la predicción precisa de ruido durante el despegue.

Por otro lado, se han realizado experimentos con modelos a escala para investigar este fenómeno, pero mantener la coherencia con un lanzamiento real se convierte en un desafío considerable [9]. Las simulaciones numéricas, por otro lado, presentan la ventaja de proporcionar información precisa sobre el comportamiento del flujo en todo el dominio. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), gracias a los avances en algoritmos y la capacidad de supercomputación, se ha convertido en un enfoque más accesible en comparación con los experimentos equivalentes [7,8]. El CFD es el cálculo matemático de las ecuaciones que rigen los fluidos utilizando la potencia de cálculo para predecir el comportamiento diferentes variables como la velocidad o la turbulencia.

Diferentes estudios han utilizado con éxito CFD para la predicción del ruido debido a chorros supersónicos [8]. Para simular el despegue de los vehículos de lanzamiento, el modelo numérico debe captar las ondas de choque tanto de la zona de chorro libre como de las interacciones con la plataforma de lanzamiento. Además, debe resolver la capa de mezcla turbulenta en el chorro y en las paredes. La resolución de todos estos fenómenos en un dominio tan grande como el que ocupa la plataforma de despegue (95 metros de longitud aprox.) resultan en un elevado coste computacional para realizar estos estudios. Para solucionarlos, algunos estudios utilizan CFD para la generación de ruido y Computational Aeroacoustics, CAA, para la propagación del sonido.

Nuestro enfoque está basado en utilizar el mismo modelo CFD para resolver la generación y la propagación del ruido. En [4], propusimos una simplificación del modelado de la turbulencia para reducir el coste computacional con un modelo *Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes* (URANS). Más tarde evaluamos el rendimiento y precisión del modelo URANS y un modelo *Large Eddy Simulation* (LES) respecto a unos datos experimentales [5]. La principal ventaja del LES frente a los modelos URANS es que se modelan las pequeñas escalas turbulentas isotrópicas y el resto se calculan directamente, mientras que en URANS se modeliza todo el espectro de turbulencia [6]. Como el LES resuelve las grandes escalas de turbulencia, puede calcular las variaciones temporales, al igual que URANS, y además las fluctuaciones de presión. Por ello, en la comparativa realizada

el LES mostró una excelente concordancia con los resultados de las pruebas experimentales a un bajo coste computacional.

Por ello, en este trabajo estudiamos el ruido generado durante el lanzamiento del vehículo lanzador VEGA mediante el modelo LES. El objetivo es analizar cómo afectan las reflexiones en la plataforma a la generación y propagación del ruido. Además, nos centramos en analizar cómo es el campo acústico generado alrededor de la cofia del lanzador donde se almacena la carga transportada como por ejemplo los satélites.

2. METODOLOGÍA

2.1. Ecuaciones que gobiernan el problema

La dinámica de fluidos computacional, más conocida como CFD, es una herramienta numérica que utiliza procedimientos de modelización para investigar el comportamiento de los flujos. Su principal objetivo es resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para calcular variables de interés y relevancia práctica. Las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven mediante el Método de Volúmenes Finitos (MVF).

Para modelar correctamente la turbulencia generada por los gases del motor cohete se ha seleccionado resolver las ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo LES. El modelo LES calcula la turbulencia a gran escala y modela la turbulencia más pequeña que la malla, a escala de submalla (SGS). El concepto se basa en el hecho de que los remolinos a gran escala transportan gran parte de la energía turbulenta, mientras que los remolinos más pequeños contribuyen menos y, por lo tanto, son menos críticos. Por tanto, el error en las hipótesis de modelización es menor. En este trabajo hemos utilizado un código LES llamado DrNum desarrollado por enGits. Este código ha sido diseñado para un uso eficiente del cálculo en la GPU. Para flujo incompresible, las ecuaciones de Navier-Stokes resueltas en LES son:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \tau_{ij} \right] \quad (1)$$

donde \bar{u}_i es la componente de velocidad filtrada hasta la escala resuelta en el modelo, t es el tiempo, P es la presión, ρ es la densidad del fluido, x_i y x_j son las coordenadas espaciales y τ_{ij} es el tensor de Reynolds de escala submalla (SGS). Este tensor representa las correlaciones entre fluctuaciones turbulentas de pequeña escala que no son resueltas. Para modelarlas se utiliza el modelo de Smagorinsky, dicho término se calcula como una función de la viscosidad turbulenta, ν_T y tasa de fluctuación de \mathbf{S}_{ij} tal que

$$\tau_{ij}^{SGS} = -2\nu_T \mathbf{S}_{ij} = -2(C_s \Delta)^2 |\mathbf{S}| \mathbf{S}_{ij} \quad (2)$$

donde C_s es la constante de Smagorinsky que varía entre 0,1 y 0,2, y Δ es la anchura del filtro asociada al tamaño del mallado según la raíz cúbica del volumen de la celda.

2.2. Configuración del caso

En el caso se va a considerar un dominio de 200x200x200 metros. Se han realizado dos cálculos distintos: el primero considerando tan solo el vehículo lanzador y el segundo colocándolo sobre la plataforma de despegue según la configuración de despegue según la Ilustración 1 a). Como simplificación del problema se considera que los gases de salida del motor son una única especie. La condición de contorno se aplica en la salida de la cámara de combustión del motor como se observa en la Ilustración 1c). De este modo, los gases se desarrollan y expanden a través de la tobera mejorando la precisión de los resultados. En el resto del entorno se considera aire en condiciones normales. En las superficies del lanzador y la plataforma se han considerado como paredes y las fronteras del dominio como outlets con condiciones para que no se produzcan la reflexiones.

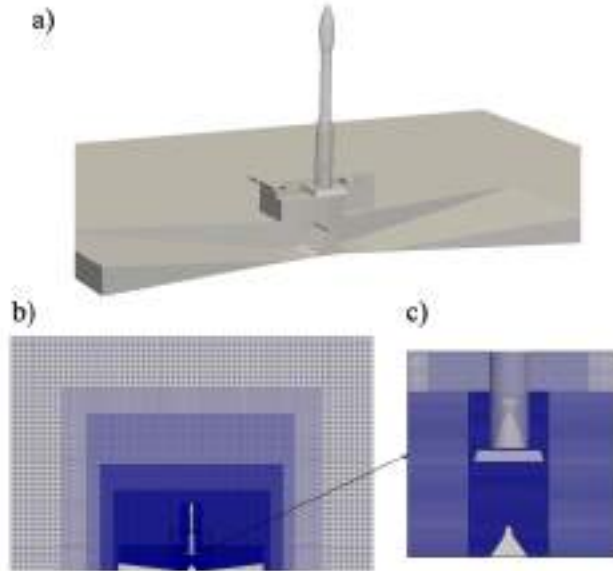


Ilustración 1. Detalles del dominio y el mallado. A) Dominio de estudio de la plataforma despegue junto con el vehículo lanzador VEGA. B) Corte del mallado utilizado y c) zoom en el deflector y el motor cohete.

Para simular la generación y propagación de ruido se ha considerado un tamaño de malla en la zona cercana a la fuente (motor, zona de desarrollo del chorro y deflector) un tamaño de malla de 2.5 cm y a lo largo de la estructura del lanzador un tamaño de 5 cm. De este modo para ambos casos se ha obtenido un mallado de alrededor de 130 millones de elementos. Además, esa discretización espacial permite analizar hasta 1400 Hz en la zona cercana y 700 Hz alrededor del lanzador. En cuanto a la discretización temporal, se ha utilizado un paso temporal de 1.4×10^{-6} s y un tiempo final de 0.5 s, lo cual da un rango de frecuencias [$1.9, 3.7 \times 10^5$] Hz.

3. RESULTADOS

3.1. Fuentes de ruido

El análisis del problema se inicia estudiando las fuentes de generación de ruido. El chorro de gases de escape del motor produce ruido a partir de la turbulencia en la capa de mezcla turbulenta, ruido asociado a las ondas de choque y ruido por las reflexiones en las superficies de la plataforma de despegue durante el lanzamiento. Las dos primeras fuentes de ruido son comunes para un chorro libre sin reflexiones y un chorro que impacta sobre una superficie.

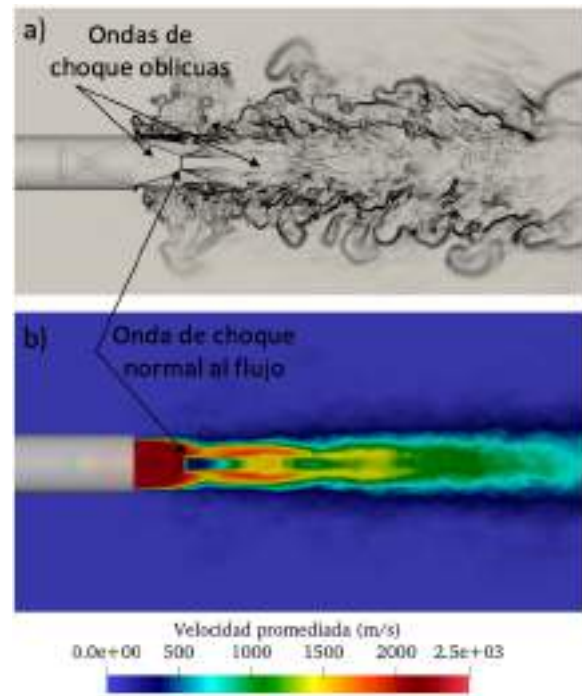


Ilustración 2. Resultados de lanzador en condición libre. A) Gradiente de la densidad. B) Velocidad promediada

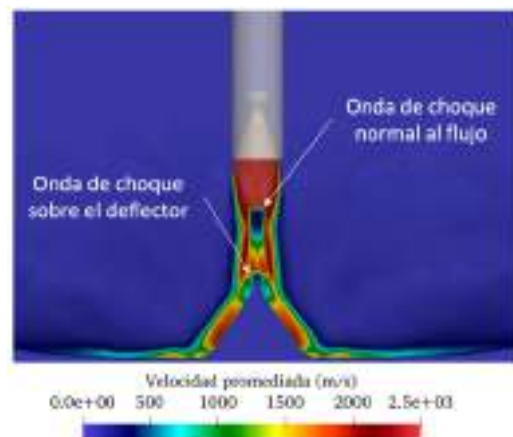


Ilustración 3. Velocidad promediada en el tiempo cuando el chorro de gases impacta con la plataforma.

En la Ilustración 2 se muestra el gradiente de la densidad y la velocidad promediada del caso del lanzador en condición libre. La velocidad promediada en el tiempo cuando el lanzador está en el instante inicial del lanzamiento en la plataforma se muestra en la Ilustración 3. En ambos casos debido a la diferencia de presión entre el chorro de gases de escape y el aire atmosférico a medida que el flujo se desarrolla fuera de la tobera aparecen diferentes ondas de choque oblicuas de expansión y una onda de choque normal a la dirección del flujo. Después de la onda de choque normal el flujo se convierte en subsónico como se puede observar en ambos casos. Además, la posición de la onda normal es la misma en ambos casos ya que las condiciones de salida del flujo son las mismas. En la Ilustración 4 a) se observa como en la región exterior del chorro, la diferencia de velocidad crea una capa de mezcla turbulenta que tiende a crecer aguas abajo. En la salida de la tobera se generan vórtices de pequeña escala que producen ruido de alta frecuencia. Aguas abajo, se generan vórtices de gran escala que generan radiación de Mach de baja frecuencia.

Cuando el lanzador está dispuesto en la plataforma de despegue, el chorro de gases impacta con el deflector el cual está diseñado para redireccionar las reflexiones acústicas. Debido a dicho impacto, se genera una onda de choque sobre el deflector. El chorro se propaga a través de los lados del deflector generando otras pequeñas ondas de choque en los cambios de curvatura de la pared. Además, sobre las paredes del deflector se genera una capa de cizalladura del chorro la cual también genera radiación de Mach.

3.2. Propagación de las ondas acústicas

Las ondas acústicas generadas por el chorro de gases se propagan hacia la cofia del vehículo lanzador donde se almacena la carga de pago. La evolución de fluctuación de la presión adimensionalizada con la presión de referencia se muestra en la Ilustración 4 para el chorro libre y en la Ilustración 5 para el lanzador en la plataforma. En el instante inicial, Ilustración 4 a), se observa una propagación esférica de diferentes ondas centradas en el chorro de escape. Las ondas de mayor intensidad en este instante viajan aguas abajo

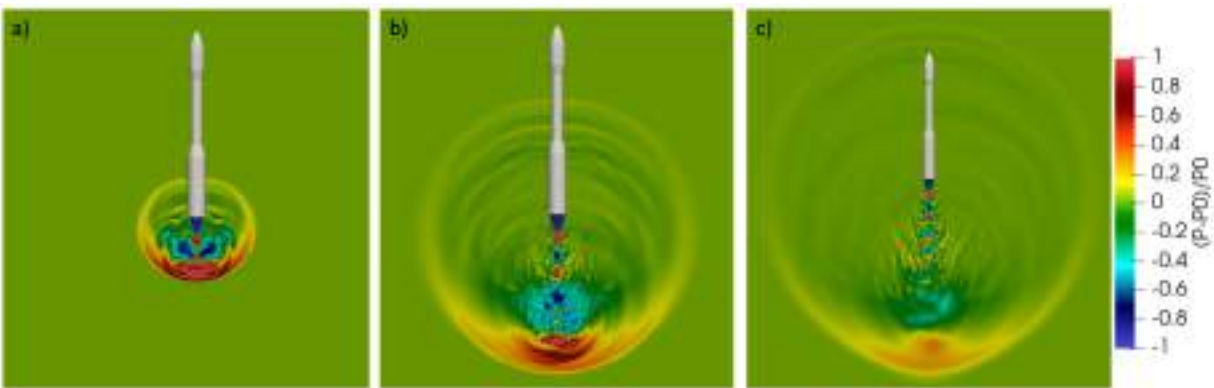


Ilustración 4. Presión fluctuante adimensionalizada con la presión de referencia del chorro de gases libre en dos instantes de tiempo a) $t=0.01$ s durante los primeros instantes de encendido del motor, b) $t=0.05$ s y c) $t=0.2$ s.

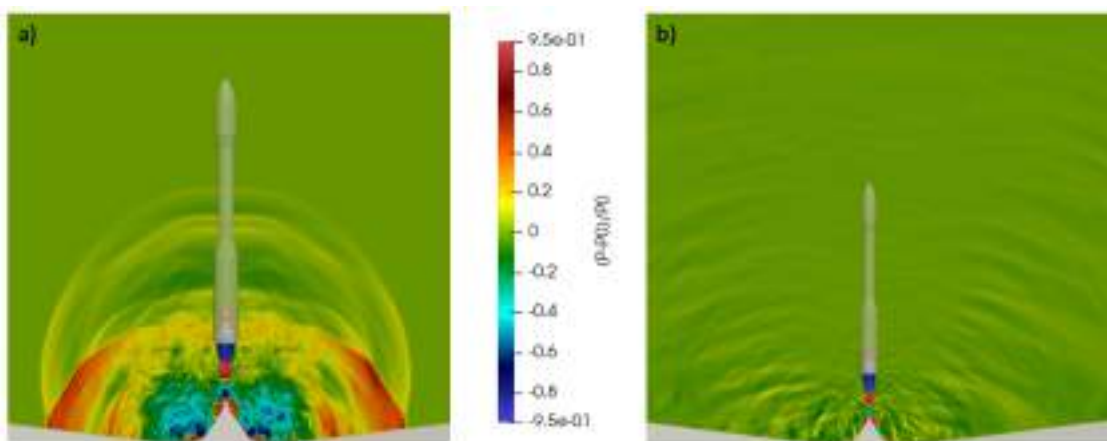


Ilustración 5. Presión fluctuante adimensionalizada con la presión de referencia del chorro de gases impactando en la plataforma en dos instantes de tiempo a) $t=0.05$ s durante los primeros instantes de encendido del motor y b) $t=0.5$ s.

del motor y son producidas por la ignición del motor. También se observa la aparición de la onda de choque normal la cual genera ondas acústicas con directividad hacia arriba. En el siguiente instante, b), el chorro continúa desarrollándose y aparecen diferentes ondas de choque en el centro del chorro marcadas por celdas que cambian de color del azul al rojo. Además, también se observan las ondas acústicas en dirección perpendicular al chorro debidas a la turbulencia de la capa de mezcla. Los gradientes más significativos se producen en las ondas de choque, como era de esperar. En el último instante de tiempo, c), las ondas acústicas han alcanzado y sobre pasado la cofia del lanzador. Aguas abajo, la intensidad de las fluctuaciones disminuye con su propagación en el espacio. No obstante, la turbulencia generada por el chorro y la interacción de esta con las ondas de choque sigue generando ondas acústicas con directividad mayoritariamente aguas abajo.

Al disponer el vehículo lanzador sobre la plataforma de despegue, las distintas superficies modifican la propagación del campo acústico generado. El efecto más notable es la redirección de las ondas acústicas hacia el vehículo lanzador como se observa en la Ilustración 5 a). En el primer instante de tiempo, se observa como el frente con mayor intensidad se propaga a lo largo de los conductos de evacuación de gases de escape. También puede distinguirse un conjunto de ondas de menor intensidad resultantes del encendido del motor que alcanzan el centro del vehículo de lanzamiento. Además, se observa un menor número de ondas de choque, así como turbulencia alrededor del deflector generado fluctuaciones de presión.

Después de 0.5, s Ilustración 5 b), la intensa onda resultante del choque inicial del chorro se ha propagado en la rampa y sobre el vehículo lanzador. Algunas ondas se propagan de forma vertical a lo largo del lanzador debidas a las reflexiones en la punta del deflector. No obstante, el deflector es capaz de separar eficazmente hacia los lados las ondas acústicas. Así, se observa como las ondas se propagan mayoritariamente alejadas del lanzador. Estas ondas con propagación diagonal se deben al ruido de mezcla turbulenta y a las reflexiones en las paredes laterales del deflector.

Para analizar el efecto de las distintas ondas en el campo acústico alrededor del lanzador, se calculan los niveles de presión acústica, SPL, mediante la transformada rápida de Fourier. Los puntos de medición se colocan a lo largo de una línea vertical en el dominio del fluido a 2 m del centro del vehículo. Cada punto ha recogido 376 muestras repartidas en 0,4 s con un paso de tiempo de $2e^{-6}$ s.

La Ilustración 6 muestra el OASPL a lo largo de una línea vertical junto al lanzador. La zona gris a 10 metros corresponde a la estructura de soporte del cohete que interfiere con los gases. La zona donde se encuentra la cofia es un área gris entre 35 y 42 metros. Cabe destacar que hay una reducción de ruido tras la estructura de soporte del lanzador ya que el chorro de gases que es la fuente de ruido ya no está presente. Se observa como en $x=4.5$ m, donde se

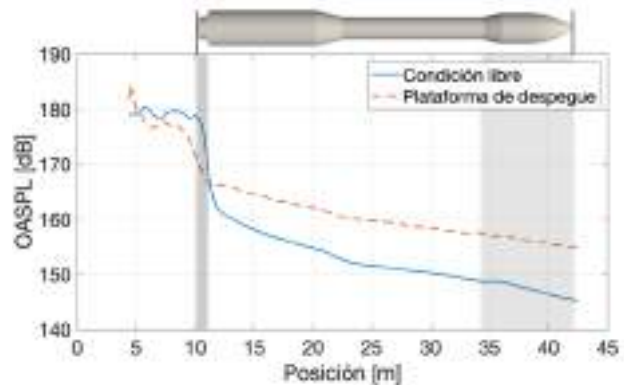


Ilustración 6. Comparativa de la distribución de nivel de presión acústica global (OASPL) a lo largo del lanzador para condición libre y en plataforma de despegue.

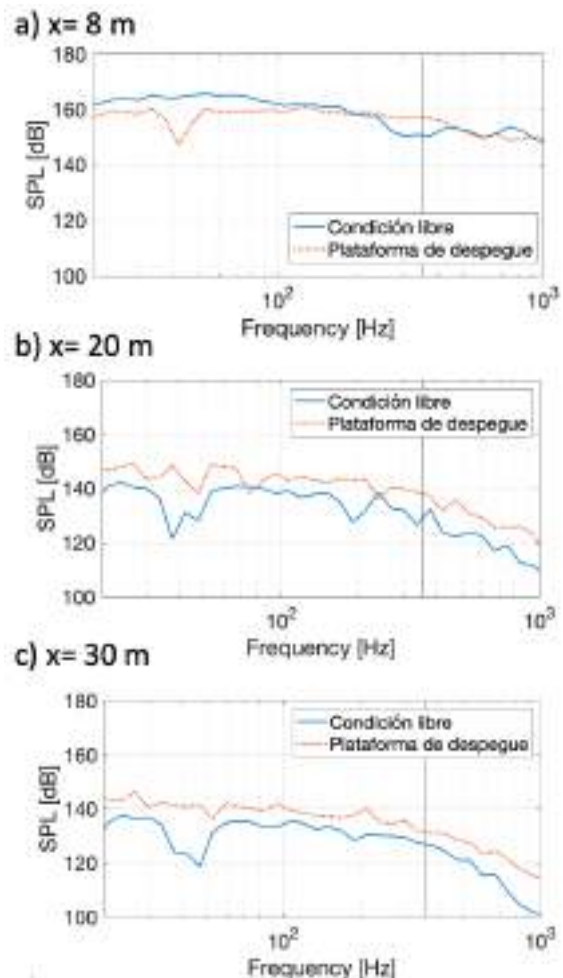


Ilustración 7. Espectro de nivel de presión sonora en diferentes posiciones a lo largo del lanzador.

ubica el deflector, es mayor el OASPL en el caso con plataforma debido al impacto del chorro de gases con el deflector. No obstante, en la zona de desarrollo del chorro sin deflector, de $x=[6, 10.1]$ m, el ruido generado es mayor para

el chorro libre ya que genera más ondas de choque y turbulencia que el caso libre. A lo largo del lanzador, por encima de la plataforma de despegue en $x=11$ m, el OASPL decrece en ambos casos con la distancia a medida que se propaga el ruido. Además, los niveles sonoros son siempre mayores en el caso del lanzador en la plataforma de despegue debido a las reflexiones en la plataforma de despegue. Las reflexiones en la plataforma generan un aumento máximo del OASPL en la zona de la cofia de 9.6 dB.

La Ilustración 7 a) presenta el SPL en 1/6 de octava medido en el campo cercano del chorro a 8 metros del suelo, lo que es lo mismo que a 3 metros delante de la salida del motor. En esta posición el espectro de ruido es muy similar en ambas configuraciones. Antes de los 200 Hz, el SPL generado es mayor en el caso libre y después de esta frecuencia se invierte. Se observa como al disponer el lanzador en la plataforma, se genera un mínimo alrededor de 40 Hz con una diferencia de 17 dB. Esta modificación del campo cercano es debida a las reflexiones en el deflector.

El SPL en campo lejano a lo largo del lanzador se muestra en la Ilustración 7 b) y c). En el punto a $x=20$ m, en casi todos los puntos el SPL generado en el caso en la plataforma es mayor. En cambio, más arriba en el punto $x=30$ m, las reflexiones en la plataforma generan un mayor SPL. De acuerdo con lo observado en la Ilustración 6, a mayor altitud la amplitud del SPL disminuye. En ambas posiciones, a bajas frecuencias se genera el SPL máximo y en altas frecuencias el SPL decrece. Por tanto, hay mayor contenido de energía acústica en las bajas frecuencias. En cuanto a diferencia entre configuraciones, en $x=20$ m hay una media de 14.7 dB de deferencia y en $x=30$ m la diferencia aumenta y hay 17.9 dB. Por tanto, la discrepancia entre casos aumenta con la distancia.

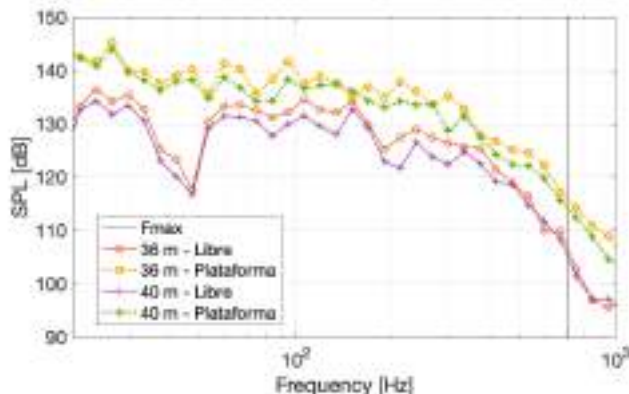


Ilustración 8. Espectro de SPL en dos puntos alrededor de la cofia en condición libre (línea sólida) y en plataforma (línea punteada).

Por último, se estudia el espectro de SPL en el campo lejano sobre la cofia del vehículo lanzador donde se ubica la carga de pago transportada. Se muestra con la línea sólida los resultados para la configuración libre y con línea punteada para configuración en la plataforma. Se observa como el SPL generado por las reflexiones en la plataforma

siempre es mayor que cuando el lanzador esta libre. Además, se observa un mínimo entre 30-50 Hz en el caso libre que no permanece en el caso de la plataforma. Del mismo modo que a lo largo del lanzador, a bajas frecuencias se producen las frecuencias máximas.

4. CONCLUSIONES

Con la creciente competitividad del negocio de los vehículos de lanzamiento, es crucial reducir las cargas dinámicas generadas. Las mediciones experimentales durante el despegue suponen un reto debido a las duras condiciones. En este trabajo, hemos demostrado el potencial del CFD para ser utilizado como método de predicción de las cargas acústicas en el lanzamiento de cohetes.

Se ha estudiado el vehículo lanzador Vega en condición libre y en la configuración sobre la plataforma de despegue. Se ha observado la propagación de las ondas de presión y las reflexiones, influidas por las ondas de choque y la turbulencia. Las fluctuaciones de presión más elevadas son creadas principalmente por estos fenómenos, lo que subraya la necesidad de minimizarlos. Además, se ha observado que se genera mayor energía acústica en las bajas frecuencias hasta 200 Hz.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto DIN2019-010877, el proyecto RTI2018-102256-B-100 de Mineco/FEDER, y el proyecto PID2019-109175GB-C22. Los autores agradecen el apoyo de la empresa EnGits por el soporte con el código DrNum.

7. REFERENCIAS

- [1] J. P. Arenas, R. N. Margasahayam, 'Recent trends in porous sound-absorbing materials ' *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería* 14, diciembre 2006.
- [2] ECSS, 'Spacecraft mechanical loads analysis handbook', European Cooperation for Space Standardization, 2013.
- [3] K. M. Eldred, 'Acoustic loads generated by the propulsion system', Tech. rep., NASA Technical Reports Server 1971.
- [4] M.S. Escarti-Guillem, S. Hoyas, L.M. García-Raffi, 'Rocket plume URANS simulation using openfoam', *Results in Engineering*, 2019.
- [5] M. S. Escarti-Guillem, L. M. Garcia-Raffi, S. Hoyas, O. Gloth, 'Assessment of computational fluid dynamics acoustic prediction accuracy and deflector impact on launch aero-acoustic environment', in: *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 50, AIP Publishing, 2022.
- [6] S. Hoyas, M. Oberlack, S. Kraheberger, F. Alcantara-Ávila, J. Laux, 'Wall turbulence at high friction Reynolds numbers', *Physical Review Fluids* 2021.
- [7] C. Jiang, T. Han, Z. Gao, 'A review of impinging jets during rocket launching', *Progress in Aerospace Sciences* 109, 2019
- [8] T. Nonomura, H. Nakano, Y. Ozawa, D. Terakado, K. Fujii, A. Oyama, 'Large eddy simulation of acoustic waves generated from a hot supersonic jet', *Shock Waves* 29 (8), 2019.
- [9] J. Panda, R. Mosher, 'Microphone phased array to identify liftoff noise sources in model-scale tests', *Journal of Spacecraft and Rockets* 50, 2013.
- [10] C.K. Tam, 'Supersonic jet noise', *Annual review of fluid mechanics* 27(1), 1995).

HOMOGENEIZACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO DE RESONADORES MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Francisco Simón Hidalgo^{1}*
Marcos Chimeno Manguán²
Pedro Cobo Parra¹

¹ITEFI - CSIC, Madrid, España

²Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

Los resonadores son una herramienta útil para el acondicionamiento acústico y el control de ruido. Presentan una gran absorción del sonido en su banda de trabajo. En la actualidad se pueden conseguir anchos de banda de al menos una octava lo que ha ampliado su utilidad. Estos dispositivos son muy conocidos y han sido muy estudiados de forma que existen gran cantidad de modelos que permiten describir su comportamiento y prestaciones. Cuando se integran dentro de una estructura compleja y su rango de trabajo pertenece a las bajas frecuencias se necesita incluirlos en modelos de elementos finitos que permiten tener en cuenta la contribución de su respuesta en la global de la estructura. Dado el pequeño tamaño de estos elementos el modelo numérico de configuraciones en las que su uso es extensivo es muy grande y en consecuencia poco práctico o incluso impracticable. En este trabajo se describe un método que reduce el tamaño del modelo de un recubrimiento de resonadores mediante su homogeneización a un fluido isótropo de propiedades acústicas equivalentes. Se describe el método utilizado, se verifica mediante la comparación con la respuesta para onda incidente plana y después se aplica a un caso realista.

ABSTRACT

Resonators are a useful tool for acoustic conditioning and noise control. They present high sound absorption values in their working band. Currently, they can have bandwidths of at least one octave, which has expanded their usefulness. These devices are very well known and have been well studied so that there are a large number of models that allow describing their response and performances. When they are

integrated into a complex structure and their working range is in the low frequencies, they need to be included into finite element models that allow their response to be into the global response of the structure. Given the small size of these elements, the resulting numerical model is very large and consequently impractical or even unfeasible. This work describes a method that reduces the model size of a resonators array covering a plate structure by homogenization to an acoustically equivalent isotropic fluid. The method is described, verified by comparison with the response for plane incident wave and then applied to a realistic case.

Palabras Clave— resonador de Helmholtz, impedancia acústica, homogeneización.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de resonadores es una herramienta muy extendida dentro del acondicionamiento y control del ruido. Ofrecen una respuesta con una absorción muy alta lo que permite controlar con precisión el campo reflejado sobre una frontera o estructura. Cuando se utilizan de forma intensiva como recubrimientos de paredes presentan algunos inconvenientes desde el punto de su diseño y posterior caracterización mediante métodos de elementos finitos como puede ser la necesidad de realizar una discretización muy precisa lo que conduce a modelos extremadamente grandes que son difíciles de gestionar con tiempos de cálculo inasumibles.

Una forma de simplificar estos modelos es mediante homogeneización, entendiéndose por tal un procedimiento que consiste en la sustitución de un material heterogéneo por uno homogéneo equivalente. Este proceso es importante cuando se intenta, por ejemplo, estudiar propiedades de materiales

* *Autor de contacto:* f.simon@csic.es

Copyright: ©2023 Francisco Simón et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

con heterogeneidades ya que permite la simplificación de los modelos y la implementación de procedimientos de ingeniería. En acústica este proceso se utiliza ampliamente para el estudio de la propagación dentro de medios porosos como lanas, espumas o aglomerados granulares [1,2,3] en los que el material se sustituye por un fluido homogéneo equivalente. Éste es el principio en el que se apoya este trabajo. Un resonador tiene una estructura tal que no permite homogeneizar su interior pero lo que si permite es definir un fluido equivalente cuya impedancia superficial coincide con la impedancia de entrada al resonador, que es el parámetro necesario para su uso como acondicionador acústico.

El objetivo de este trabajo es la homogeneización de un array 2D de resonadores de Helmholtz a una capa de fluido de espesor dado para su uso como sustituto en los modelos de propagación acústica. Para ello se calcularán los parámetros del fluido equivalente mediante los resultados obtenidos de la simulación de ensayos de impedancia acústica superficial en tubo de impedancia. El método se validará mediante su aplicación a un material poroso de propiedades conocidas, después se aplicará a los resonadores objeto de estudio y por último se aplicará el resultado a la caracterización del campo acústico de una cavidad cilíndrica.

2. MÉTODO

Las propiedades que definen las características de propagación de fluido son su densidad, r , velocidad de propagación, c , módulo de compresibilidad, k , número de onda, k_c , e impedancia característica, Z_c . Estas propiedades no son independientes una de otras si no que están relacionadas de forma que es suficiente con determinar dos de ellas para conocer el resto. De esta manera existen tres parejas de posibles propiedades que pueden utilizarse para definir un fluido acústicamente homogéneo. Éstas son: (r,c) , (Z_c,k_c) , o (k,r) .

En este trabajo se considera la segunda de las opciones de forma que para definir el fluido que sustituya a nuestro array de resonadores se debe obtener la impedancia característica y el número de onda que tendría un fluido de forma que a su salida tenga una impedancia acústica superficial igual a la impedancia superficial a la salida del resonador.

La determinación de Z_c y k_c se realiza mediante simulación de ensayos destinados a la obtención de estos parámetros. El ensayo a simular se corresponde con el de la determinación de la impedancia superficial en tubo de impedancia según norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 [4].

Se considera la configuración mostrada en la Figura 1. En la que se puede ver la muestra (de color) instalada en un tubo de impedancia y separada de la contramasa por una cavidad de aire con dos espesores diferentes.

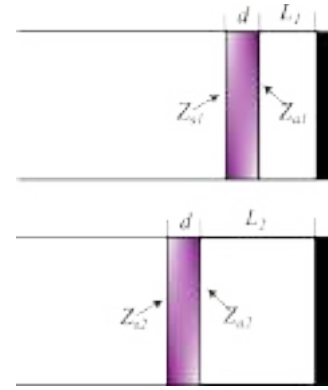


Figura 1. Esquema de la configuración de ensayo simulada para la determinación de Z_c y k_c equivalentes del resonador.

La expresión de la impedancia superficial en la cara exterior de la muestra para cualquiera de las dos configuraciones es [5]:

$$Z_{si} = Z_c \frac{Z_c - jZ_{ai} \cot(k_c d)}{Z_{ai} - jZ_c \cot(k_c d)} \quad (1)$$

donde Z_{si} es la impedancia superficial calculada para cada configuración, d el espesor del array de resonadores (y de la capa de fluido equivalente) y Z_{ai} la impedancia superficial de la cavidad de aire en su encuentro con la superficie interior de la muestra. La expresión de Z_{ai} es [2]:

$$Z_{ai} = -jZ_0 \cot(kL_i) \quad (2)$$

siendo Z_0 la impedancia característica del aire, k el número de onda del campo sonoro en el aire y L_i el espesor de la cavidad de aire.

Dado que las variables a calcular son dos (Z_c y k_c), se necesitan dos ecuaciones independientes. Aquí ambas ecuaciones se obtienen a partir las dos configuraciones mostradas en la Figura 1. En ellas las características de la muestra son las mismas pero las ecuaciones no gracias al cambio de espesor de la cavidad de aire. Si se despeja la cotangente de la Ec. 1 se obtiene:

$$\cot(k_c d) = \frac{Z_{si} Z_{ai} - Z_c^2}{Z_{ai} Z_c - Z_{si} Z_c} \quad (3)$$

Y dado que este valor es el mismo para ambas configuraciones de las ecuaciones resultantes se puede despejar el valor de Z_c :

$$Z_c = \pm \sqrt{\frac{Z_{s1} Z_{s2} (Z_{a1} - Z_{a2}) - Z_{a1} Z_{a2} (Z_{s1} - Z_{s2})}{(Z_{a1} - Z_{a2}) - (Z_{s1} - Z_{s2})}} \quad (4)$$

y el valor de k_c a través de la Ec. 3:

$$k_c = \frac{1}{d} \cot^{-1} \left(\frac{Z_{si} Z_{ai} - Z_c^2}{Z_{ai} Z_c - Z_{si} Z_c} \right) \quad (5)$$

De acuerdo a la Ec. 5 el valor de k_c se puede obtener de cualquiera de las dos configuraciones simuladas.

3. MODELOS NUMÉRICOS

3.1. Validación

Los modelos numéricos se implementan en COMSOL [6], programa de cálculo científico basado en elementos finitos. El primer modelo es la implementación de un tubo de impedancia en el que se ha instalado una muestra consistente en una espuma de melamina. En la parte posterior de la muestra absorbente se dejan dos cavidades de aire diferentes, lo que da lugar a las dos configuraciones descritas. La espuma es un material poroso del que se conocen sus datos y su comportamiento como material absorbente de modo que se utiliza como referencia para validar el método.

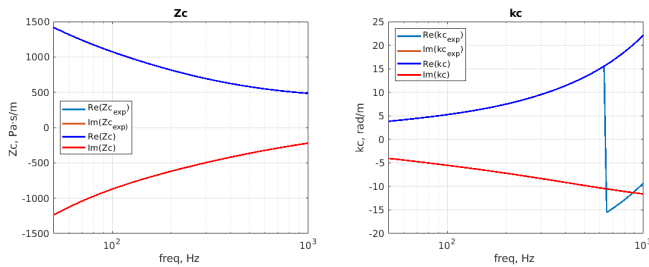


Figura 2. Valores teóricos y numéricos de Z_c y k_c de la espuma de melamina.

En la Figura 2 se muestran los resultados de la simulación comparados con los datos teóricos de la espuma de melamina simulada. Se puede ver su coincidencia salvo para k_c en un intervalo de frecuencias donde se produce un salto de fase que no afecta a los valores de Z_c , como se puede apreciar en la Figura 3

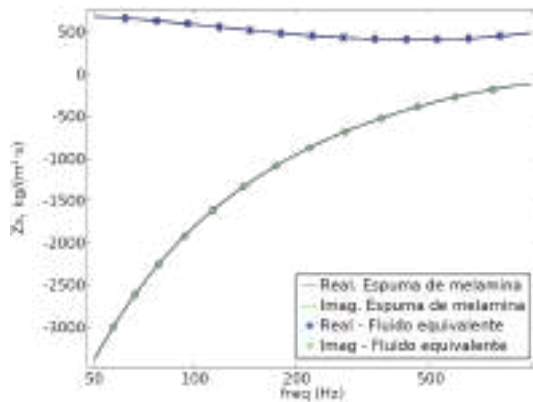


Figura 3. Impedancia superficial de la espuma de melamina calculada a partir tanto de los valores teóricos como de los valores del fluido equivalente.

3.2. Fluido equivalente de un resonador

Una vez validado el método de cálculo se aplica a un resonador de Helmholtz cuyas características son: volumen, 50 cm^3 , sección del cuello, 1.2 cm^2 , longitud del cuello, 8 cm y resonancia situada en 272 Hz . En la Figura 4 se muestra su geometría así como su disposición dentro del tubo en el que se modela el ensayo, junto con la ubicación de la posición de los “micrófonos” utilizados para el cálculo de Z_{si} .



Figura 4. Geometría del modelo del ensayo de los resonadores dentro del tubo de impedancia.

En la Figura 5 se muestran los valores de Z_c y k_c del fluido equivalente y en la Figura 6 la curva de absorción del resonador y del fluido equivalente. En todas ellas se observa como la resonancia está situada donde se espera.

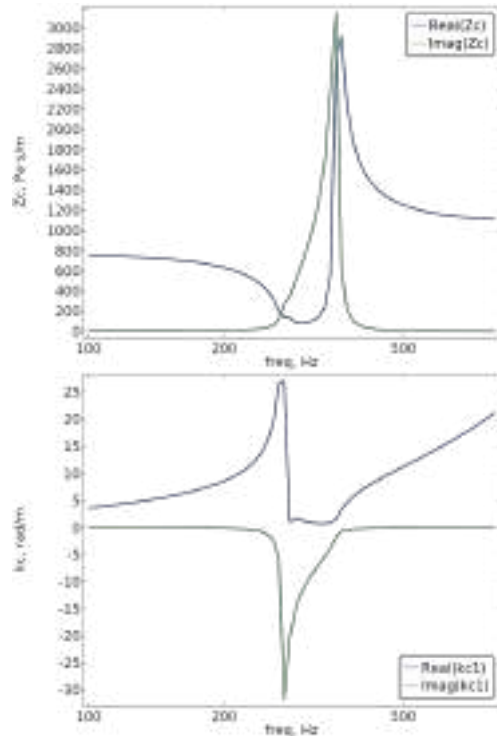


Figura 5. Valores teóricos y numéricos de Z_c y k_c del resonador de Helmholtz.

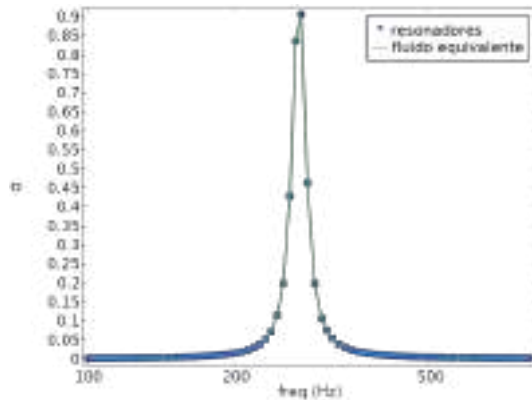


Figura 6. Coeficiente de absorción en tubo de impedancia de los resonadores y del fluido equivalente.

3.2. Campo acústico en el interior de un cilindro

En este apartado se estudia el efecto de introducir un recubrimiento de resonadores sobre las paredes de un cilindro. El cilindro posee un radio de 60 cm y una altura de 2 m de altura y está cerrado por sus dos bases formando una cavidad de 2.26 m^3 , las fronteras exteriores tienen una superficie total de 9.80 m^2 .

Éste es un caso típico para el que está pensado el uso del fluido equivalente calculado en este trabajo. El modelado del recubrimiento (el array de resonadores) requiere de tal cantidad de nodos para describir con la suficiente precisión el campo acústico que el tamaño del modelo no es viable por la cantidad de memoria necesaria. Sólo el uso de grandes sistemas de cálculo permitiría implementar el modelo pero en ese caso el tiempo de cálculo necesario lo haría poco práctico.

En cambio, sustituyendo el array de resonadores por una capa de fluido equivalente el tamaño del modelo se reduce lo suficiente para ser calculado.

En el modelo se supone que exclusivamente acústico y el campo acústico se carga con una fuente puntual en su interior. La Figura 7 muestra el resultado del campo sonoro medio en el interior del recinto antes y después de aplicar el tratamiento. La comparación entre ellos muestra una reducción de los niveles de presión sonora en la banda de trabajo del resonador mientras que en el resto de frecuencias ambos modelos presentan un comportamiento similar.

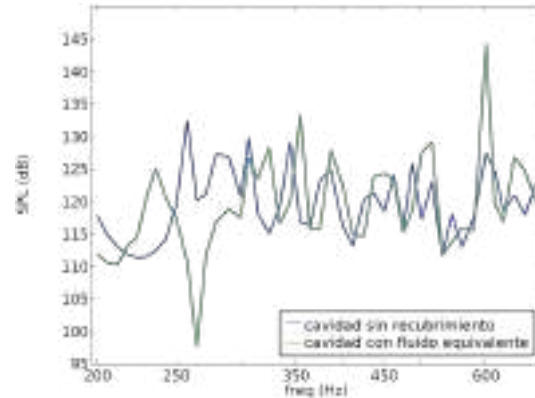


Figura 7 Niveles sonoros medios en el interior del cilindro con y sin recubrimiento de fluido equivalente.

12. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ofrece una alternativa a la modelización directa de recubrimientos formados por gran cantidad de celdas de pequeño tamaño. Esta sustitución ayuda a reducir el tamaño de los modelos numéricos lo que permite trabajar con sistemas y estructuras que de otra forma, por su tamaño, sería imposible.

La simplificación se realiza mediante la homogeneización de un array de resonadores a un fluido equivalente lo que permite sustituir una capa altamente heterogénea por una homogénea que requiere un mallado menos exigente.

La homogeneización se realiza mediante la determinación de la impedancia característica y el número de onda que tendrían dicho fluido para lo que se utiliza el método del cálculo de la impedancia superficial en tubo de impedancia.

El método se ha validado mediante su aplicación a una espuma porosa conocida y después se ha aplicado a la determinación de un resonador dado.

Por último el fluido equivalente obtenido se aplica a un caso tipo como es el recubrimiento de una cavidad cilíndrica.

12. REFERENCIAS

- [1] Delany, M. and Bazley, E. “*Acoustical Properties of Fibrous Materials*”. App. Acoust., vol. 3, pp. 105-116, 1970
- [2] Johnson, D., Koplik, J., & Dashen, R. “*Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media*”. Journal of Fluid Mechanics, vol. 176, pp. 379-402, 1987
- [3] Yvan Champoux, Jean-F. Allard; “*Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media*”. J. Appl. Phys. 15; vol. 70 no. 4, pp. 1975–1979, 1991

[4] UNE-EN ISO 10534-2:2002. *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.* (ISO 10534-2:1998).

[5] Allard, J.F. and Atalla, N. (2009) *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials.* 2nd Edition, Wiley-Blackwell, Hoboken

[6] COMSOL Multiphysics® v. 5.5. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

SISTEMAS ACÚSTICOS UNIDIMENSIONALES CON CONDICIONES DE CONTORNO MODULADAS TEMPORALMENTE

Jaime Galiana Nieves^{1*}
Javier Redondo¹
V́ctor J. Sánchez-Morcillo¹
Rubén Picó¹

¹ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Campus de Gandía

RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento de sistemas acústicos con propiedades que varían en el tiempo mediante la implementación numérica de condiciones de contorno moduladas temporalmente. Fenómenos en reflexión, tales como el efecto Doppler, o variaciones en las propiedades efectivas del medio, se modelizan mediante simulaciones numéricas de objetos móviles. Este trabajo se centra en el estudio de estos fenómenos a partir de una implementación de sistemas cuyas condiciones de contorno, dependientes en el tiempo, se simulan a partir de la respuesta al impulso obtenida de la impedancia de entrada del sistema en el dominio frecuencial. La variación temporal de esta respuesta al impulso describe las propiedades del sistema cuyas características que definen su impedancia de entrada variable en el tiempo.

ABSTRACT

In this work, we study the behaviour of acoustic systems with time-varying properties by means of the numerical implementation of temporally modulated boundary conditions. Reflection phenomena, such as the Doppler effect, or variations in the effective characteristics of the medium, are modelled by means of numerical simulations of moving objects. This work focuses on the study of these phenomena from an implementation of systems whose time-dependent boundary conditions are simulated from the impulse response obtained through the input impedance of the system in the frequency domain. The time variation of this impulse response describes the properties of the system whose characteristics define its time-varying input impedance.

Palabras Clave— Absorción acústica, filtros FIR, variación temporal, FDTD, resonador de Helmholtz

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha comenzado a estudiar en profundidad la creación de metamateriales fundamentados en la variación temporal de sus propiedades, además de las geometrías que los forman[1–3]. Ejemplos de esto serían materiales cuyas características físicas, como su densidad o la velocidad de propagación del sonido en dicho medio, cambiasen con el tiempo. En este trabajo se estudia la variación temporal de los parámetros efectivos dependientes de la geometría de un sistema. Este sería el caso de los resonadores de Helmholtz, HR, [4, 5]. Estos sistemas presentan unas características de densidad e impedancia acústica efectivas que dependen de la proporción de sus partes geométricas. Variando temporalmente el volumen de estos resonadores, es posible obtener características acústicas. Para el estudio de los sistemas variables en el tiempo mediante simulaciones numéricas, han de usarse métodos que permitan observar la evolución temporal de la propagación del sonido en estos materiales. Este es el caso del método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) [6]. Este método permite estudiar los fenómenos de reflexión y absorción acústica producidos por un sistema en el dominio del tiempo. En el caso de que las variaciones temporales del medio bajo estudio se apliquen sobre las características intrínsecas del mismo, este método es suficiente para el estudio de los fenómenos producidos por estos cambios[7]. Sin embargo, cuando los cambios en el tiempo se producen sobre la geometría del sistema, han de seguirse otros procedimientos.

* **Autor de contacto:** jaiganie@doctor.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. OBJETIVOS

En este trabajo, el objetivo principal es obtener un modelo para simular la acústica en una geometría compleja y variable en el tiempo substituyéndola por una condición de contorno. De esta manera se puede lograr simplificar simulaciones que de otra manera resultarían muy complicadas haciendo uso del método de las diferencias finitas (FDTD). En la Figura 1 se puede observar un ejemplo de simplificación de un sistema formado por un resonador de Helmholtz variable en el tiempo ubicado al final de un tubo. Dicho resonador se substituye por una condición de contorno en forma de filtro de respuesta finita (FIR) cuyos coeficientes serán los obtenidos mediante el procesamiento de la admitancia del sistema.

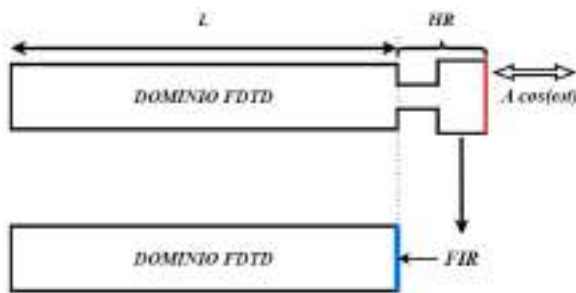


Figura 1. Esquema de resonador de Helmholtz variable en el tiempo implementado como condición de contorno. El contorno oscilante (rojo) varía armónicamente con una amplitud y frecuencias definidos. El sistema se substituye por un contorno dependiente del tiempo (azul).

3. TEORÍA Y MÉTODOS

En este apartado se muestran los pasos seguidos para la substitución de un sistema geométrico por una condición de contorno que dependa del tiempo.

3.1. Filtro FIR como condición de contorno.

En FDTD, una manera de definir una condición de contorno es a partir de la relación entre la presión sonora y la velocidad de partícula:

$$v(L) = p(L)/Z \quad (1)$$

donde v y p son los valores de velocidad de partícula y presión sonora en un punto situado en $x=L$. La impedancia acústica, Z , definida en ese punto determina los efectos absorción y reflexión acústica producidos por el contorno. La forma más sencilla de implementar estas condiciones de contorno consiste en definir el valor de la impedancia como una constante. Por ejemplo, en el caso de desear un contorno rígido, se definiría el valor de la impedancia como infinito, haciendo nula la velocidad de partícula en ese punto.

Sin embargo, hay casos en los que es necesario implementar condiciones de contorno más complejas. Esto puede ayudar a simular materiales con otras propiedades acústicas, ya sean materiales porosos absorbentes o sistemas con geometrías complejas.

Para ello, el método que se ha utilizado en este caso es la creación de filtros de respuesta finita (FIR) y la implementación de estos en los últimos puntos del dominio[8].

Los filtros FIR se basan en el procesamiento de una señal de entrada haciendo uso únicamente de valores anteriores de dicha entrada.

La formulación de un filtro FIR discreto se expresa como

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} h[k]x[n-k], \quad (2)$$

donde y es la señal de salida, x es la señal de entrada, n es la muestra actual y M es la longitud del filtro en muestras. El parámetro h se refiere a los coeficientes del filtro, que definen la respuesta al impulso aplicada por el filtro FIR.

La formulación descrita en la ecuación (2) está discretizada, siendo equivalente a la convolución dos señales en el tiempo:

$$y(t) = h(t) * x(t). \quad (3)$$

3.2. Método de la matriz de transferencia.

El método de la matriz de transferencia (TMM) es un método analítico utilizado para estudiar la propagación de ondas acústicas en problemas unidimensionales [9]. Es un método de estudio en el dominio de la frecuencia, que permite obtener los parámetros efectivos de un sistema acústico a partir de la interacción entre sus valores de presión y velocidad en el punto inicial del sistema con los valores en su punto final a partir de la interacción entre ondas transmitidas y reflejadas. En los casos en los que se conoce la solución analítica del sistema acústico, el método de la matriz de transferencia devuelve resultados muy cercanos a los analíticos[10,11]. Este método se formula como

$$\begin{bmatrix} p(0) \\ v(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & iZ\sin(kL) \\ i\frac{1}{Z}\sin(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(L) \\ v(L) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

donde p y v son los valores de presión y velocidad. El número de onda que se propaga en el interior del sistema, k , la longitud, $L(m)$, y la impedancia característica del sistema acústico, Z , relacionan los valores en $x=0$ y $x=L$ para obtener los parámetros efectivos del sistema acústico.

La principal característica de este método es la posibilidad de diseñar sistemas complejos mediante la consecución de matrices de transferencia. Multiplicando las matrices para cada sector del sistema diseñado se obtiene una matriz global que define los parámetros efectivos de impedancia y propagación en el sistema completo.

3.3. Obtención de la respuesta al impulso de la admitancia acústica.

A partir del método de la matriz de transferencia se puede obtener la impedancia acústica de un sistema. Partiendo de la expresión mostrada en la fórmula (4) podemos definir la matriz de transferencia como

$$T = \begin{bmatrix} \cos(kL) & iZ\text{sen}(kL) \\ i\frac{1}{Z}\text{sen}(kL) & \cos(kL) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

De esta manera, podemos obtener la impedancia acústica efectiva como:

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{iZ\text{sen}(kL)}{i\frac{1}{Z}\text{sen}(kL)}} = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}}. \quad (6)$$

Este caso es válido para sistemas con condición de contorno final transparente. En el caso de considerar un sistema cuya condición de contorno en $x=L$ sea rígida, ha de forzarse que la velocidad en el punto final del sistema sea nula $v_{x=L} = 0$. De esta manera, y sabiendo que la impedancia de entrada se define como

$$Z_{x=0} = \frac{p_0}{v_0}. \quad (7)$$

Podemos definir la impedancia efectiva de un sistema con condición de contorno final rígido como

$$Z_{eff} = \frac{T_{11}}{T_{21}}. \quad (8)$$

La admitancia acústica se obtiene a partir de la inversa de la impedancia[12]. Para obtener la evolución temporal de la admitancia acústica y, con ello, los coeficientes del filtro FIR utilizado como condición de contorno, aplicamos la transformada de Fourier inversa a los resultados obtenidos a partir de la matriz de transferencia. De esta manera obtendremos la respuesta al impulso del sistema diseñado y podremos implementarlo como una condición de contorno mediante un filtro FIR como se expresa en la ecuación (3):

$$v(t) = \frac{1}{Z_{eff}(t)} * p(t) = Y(t) * p(t), \quad (9)$$

siendo $Y(t)$ la respuesta al impulso de la admitancia del material que se quiera implementar como condición de contorno en función del tiempo. El símbolo $*$ denota la operación de convolución.

3.4. Variación temporal de la condición de contorno.

Existen varios métodos para la implementación de filtros FIR variables en el tiempo [13]. En este trabajo se ha optado por la creación de una respuesta al impulso para cada paso temporal de la simulación, dependiente de la variación de la geometría del sistema diseñado. Se han diseñado los sistemas con una condición final rígida que oscila con una frecuencia y amplitud determinadas. De esta manera sólo es necesario originar una oscilación completa para poder estudiar los efectos producidos por la variación temporal de la geometría de los sistemas implementados.

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este apartado, con el objetivo de verificar el funcionamiento de los métodos previamente explicados y la respuesta de un modelo variable en el tiempo, se han realizado una serie de simulaciones 1D mediante FDTD.

En primer lugar, una vez obtenidos los coeficientes de los filtros FIR utilizados como condición de contorno, se comprueba que los resultados de las simulaciones coincidan con lo obtenido a partir de la matriz de transferencia.

En segundo lugar, se estudia la respuesta obtenida ante la variación temporal de estas condiciones de contorno. Esto se realiza tanto para un tubo simple con una pared oscilante, cuyo comportamiento en reflexión es conocido[14], como para el caso de resonadores con volumen variable.

Para la obtención de los coeficientes de los filtros FIR se han aplicado pérdidas en la implementación de la matriz de transferencia [15].

4.1. Admitancia acústica en el dominio temporal

A partir del método de la matriz de transferencia, se puede obtener la impedancia efectiva del sistema acústico diseñado. En la figura 2 se muestran los valores en frecuencia tanto de la impedancia efectiva como de la correspondiente admitancia para un resonador de Helmholtz cuya frecuencia de resonancia es de 237 Hz.

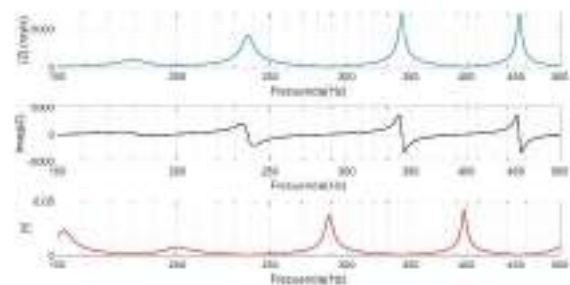


Figura 2. Valor absoluto (azul) y parte imaginaria (negro) de la impedancia obtenida a partir del método de la matriz de transferencia de un resonador de Helmholtz con una frecuencia de resonancia de 237 Hz. En rojo se muestra la admitancia del sistema.

A partir de la admitancia acústica, se puede obtener la respuesta al impulso mostrada en la figura 3 que servirá como coeficientes para el filtro FIR implementado como condición de contorno.

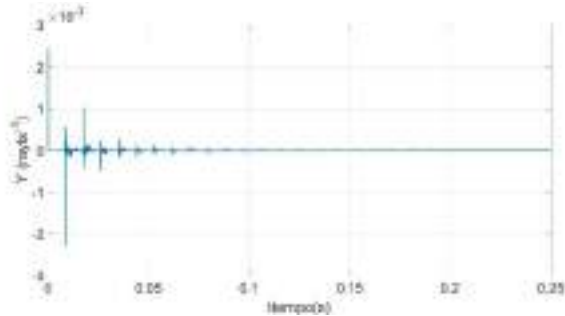


Figura 3. Respuesta al impulso obtenida a partir de la admitancia acústica de un resonador de Helmholtz con pérdidas con una frecuencia de resonancia de 237 Hz conectado a un tubo de 6m de longitud.

4.2. Impedancia y coeficiente de reflexión de sistemas estáticos.

Con los coeficientes del filtro FIR obtenidos para un HR con una frecuencia de resonancia de 150 Hz, se simula la respuesta del modelo para comprobar el correcto funcionamiento del método. En la figura 4 se muestra el coeficiente de reflexión y la impedancia obtenidas para el HR actual, comparando los resultados con los obtenidos a partir de los parámetros efectivos de la matriz de transferencia.

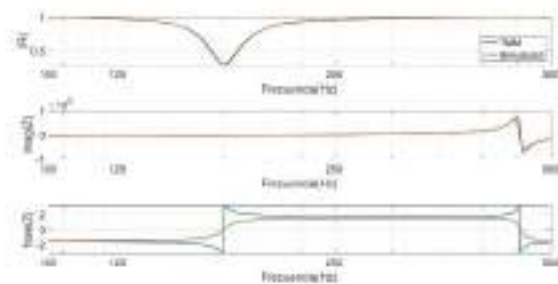


Figura 4. Coeficiente de reflexión (arriba), parte imaginaria de la impedancia acústica (centro) y fase de la impedancia (abajo) de un resonador de Helmholtz. Se muestran a partir de los resultados del TMM (azul) y las simulaciones mediante FDTD (naranja).

Se puede observar una correcta aproximación de los resultados obtenidos mediante simulaciones con los obtenidos a partir del método de la matriz de transferencia.

4.3. Sistemas móviles. El tubo oscilante y el resonador modulado.

Para comprobar el funcionamiento del modelo con condición de contorno variable en el tiempo se comprobó en primer lugar la reflexión producida por un tubo cuyo final oscila a una frecuencia concreta. Como se observa en la figura 5, la reflexión obtenida mediante simulaciones por dicho sistema excitado por un tono puro de 200 Hz y cuyo final rígido oscila a 50 Hz, produce una atenuación en la fundamental de la onda incidente. Debido al efecto Doppler se obtienen también dos armónicos centrados en la frecuencia de excitación distanciados en ambas direcciones del eje frecuencial por la frecuencia de oscilación del contorno reflectante.

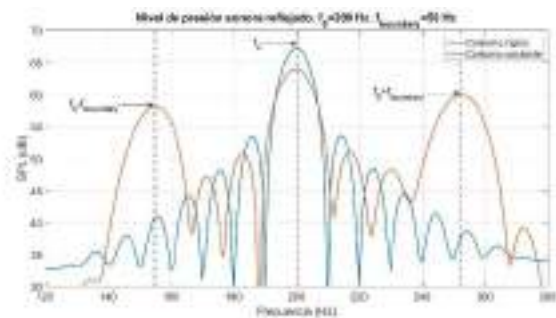


Figura 5. Nivel de presión sonora reflejado obtenido mediante simulaciones con condición de contorno dependiente del tiempo de un tubo rígido (azul) y un tubo con pared final oscilante (naranja). La onda incidente tiene una frecuencia central f_0 de 200 Hz mientras que la pared oscila a una frecuencia $f_{boundary}$ de 50 Hz.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de las simulaciones con condición de contorno variable, se procede a realizar el estudio de resonadores de Helmholtz con un volumen oscilante. Se observa la absorción acústica producida por dicho resonador, diseñador para absorber a una frecuencia de 200 Hz, con una pared final que oscila a 150 Hz con una amplitud de 1 mm. Se compara la absorción obtenida con la fase inicial de la oscilación del contorno final del resonador (figuras 6 y 7).

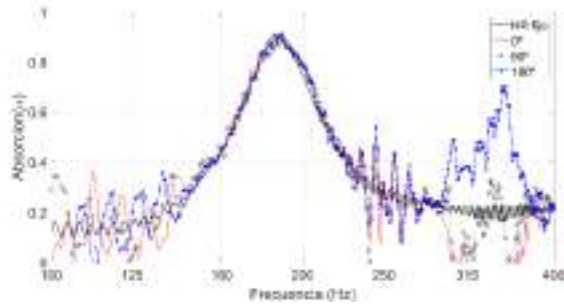


Figura 6. Coeficiente de absorción obtenido mediante simulaciones para un HR con una frecuencia de resonancia de 200 Hz. Se muestran los resultados para el HR fijo (línea negra) junto con la absorción obtenida para tres casos de HR variables: fase inicial de oscilación de 0° (rojo), 90° (puntos negros) y 180° (azul). La pared del HR oscila a 150 Hz con una amplitud de 1 mm.

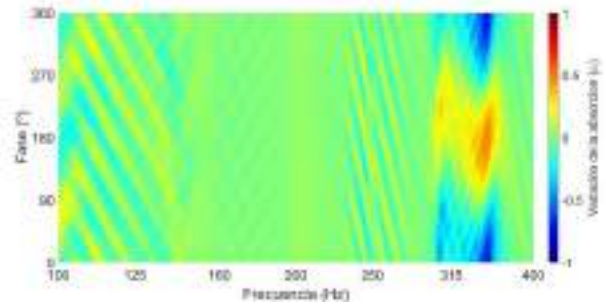


Figura 8. Variación del coeficiente de absorción obtenido a partir de los HR variables con respecto a la absorción proporcionada por el caso del HR fijo. Las zonas en rojo indican un aumento del coeficiente de absorción para cada frecuencia y fase inicial de oscilación. Las zonas en azul muestran una disminución de la absorción. La pared del HR oscila a 150 Hz con una amplitud de 1 mm.

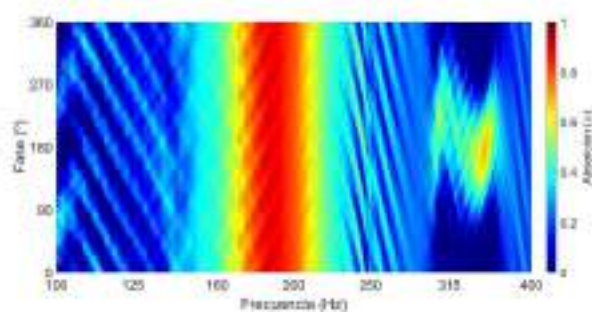


Figura 7. Coeficiente de absorción con respecto a la frecuencia y la fase inicial de oscilación de un HR con frecuencia de resonancia de 200 Hz. La pared del HR oscila a 150 Hz con una amplitud de 1 mm.

Se puede observar que la absorción producida por un HR con volumen oscilante depende de la fase inicial de la oscilación de dicho volumen. Para casos como el de una fase inicial de 180° se observa una mayor absorción en frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia del resonador, mientras que en el caso de 90° se observa un empeoramiento. En la figura 8, se observa la variación con respecto al caso del resonador con volumen fijo con respecto a la fase inicial de la oscilación del contorno.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la implementación de sistemas acústicos variables en el tiempo mediante condiciones de contorno utilizando la admitancia de entrada de dicho sistema.

Se observa una mejora en las propiedades de absorción de los resonadores variable en el tiempo para ciertas fases iniciales de la oscilación.

Cabe destacar que las simulaciones mediante FDTD de los sistemas estáticos coinciden con los resultados obtenidos mediante el método de la matriz de transferencia.

En futuros trabajos, se estudiará la influencia de la disposición, frecuencia de oscilación y fase de varios resonadores para la creación de metamateriales variables en el tiempo. Además, se mejorará la metodología de generación y variación temporal de los filtros necesarios para la implementación de las condiciones de contorno, buscando generar modelos complejos y estables.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía e Innovación (MINECO) y la Unión Europea FEDER (proyecto PID2019-109175GB-C22 y PID2022-138321NB-C22).

7. REFERENCIAS

- [1] A. G. Hayrapetyan, K. K. Grigoryan, R. G. Petrosyan, y S. Fritzsche, «Propagation of sound waves through a spatially homogeneous but smoothly time-dependent medium», *Ann. Phys.*, vol. 333, pp. 47-65, 2013, doi: 10.1016/j.aop.2013.02.014.
- [2] C. Caloz y Z.-L. Deck-Léger, «Spacetime Metamaterials, Part I: General Concepts», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, n.º 68, pp. 1569-1582, 2020, doi: 10.1109/TAP.2019.2944225.
- [3] N. Krauss y J. Paulose, «Nondispersive One-Way Signal Amplification in Sonic Metamaterials», *Phys. Rev.*, vol. 16, n.º 024020, 2022, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.024020>.
- [4] A. Zaikin, «A nonlinear model of the helmholtz resonator with a Movable Wall», *Acoust. Phys.*, vol. 42, n.º 3, pp. 329-333, 1996.
- [5] D. Zhao, C. A. Barrow, A. S. Morgans, y J. Carrote, «Acoustic Damping of a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume», *AIAA J.*, vol. 47, n.º 7, jul. 2009, doi: <https://doi.org/10.2514/1.39704>.
- [6] K. S. Yee, «Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-14, n.º 3, may 1966, doi: 10.1109/TAP.1966.1138693.
- [7] R. Picó, J. Redondo, y V. J. Sánchez-Morcillo, «Wave propagation in a time-varying elastic medium». 53º congreso Español de Acústica. XII congreso Ibérico de acústica, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Elche22/ID-108.pdf>
- [8] Botteldooren, Dick, «Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, pp. 3302-3308, 1995, doi: <https://doi.org/10.1121/1.413817>.
- [9] N. Jiménez, O. Umnova, y J.-P. Groby, *Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials and Porous Media*, vol. 143. en *Topics in Applied Physics*, vol. 143. Springer.
- [10] D. P. Jena, J. Dandsena, y V. G. Jayakumari, «Demonstration of effective acoustic properties of different configurations of Helmholtz resonators», *Appl. Acoust.*, n.º 155, pp. 371-382, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.06.004>.
- [11] A. Dell, A. Krynkina, y K. V. Horoshenkov, «The use of the transfer matrix method to predict the effective properties of acoustical systems», *Appl. Acoust.*, vol. 182, n.º 108259, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108259>.
- [12] L. E. Kinsler, A. R. Frey, Alan. B. Coppens, y J. V. Sanders, *Fundamentals of acoustics*, Fourth. en John Wiley & Sons.
- [13] F. Wefers y M. Vorländer, «Efficient time-varying FIR filtering using crossfading implemented in the DFT domain», *Forum Acusticum*, 2014.
- [14] G. Michel, «The generalized Doppler effect for surface waves», *Lett. J. Explor. Front. Phys.*, vol. 116, n.º 44002, 2016, doi: 10.1209/0295-5075/116/44002.
- [15] Stinson, Michael R, «The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape», *Acoust. Soc. Am.*, p. 10, sep. 1990, doi: 10.1121/1.400379.



ON THE CALCULATION OF TRANSMISSIBILITY FUNCTIONS FOR VIBRO-ACOUSTIC FINITE ELEMENT MODELS

Duarte Miguel Salvado Pereira¹

Miguel Matos Neves^{2}*

Nuno Manuel Mendes Maia²

Hugo Filipe Diniz Policarpo^{2,3}

¹ DEM, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

² IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

³ CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar, Base Naval de Lisboa, Almada, Portugal

* *Autor de contacto:* miguel.matos.neves@tecnico.ulisboa.pt

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

ABSTRACT

In recent years, the interest in the research of transmissibility functions rose for several applications, like Force Identification, Operational Modal Analysis, Operational Transfer Path Analysis, etc.

In this work, the authors analyze a formulation based on the Finite Element Method (FEM) and the computational effort of two methods used to obtain the transmissibility functions for acoustic and vibro-acoustic models.

In the first method, the required receptances are extracted from the inverse of the global dynamic stiffness matrix and multiplied to obtain the transmissibility between the involved responses. In the second, the required receptances are extracted from the respective adjugates of the global dynamic stiffness matrix to obtain the transmissibility.

A review and comparison of the two methods is presented for acoustic and vibro-acoustic models. To verify and compare both methods, two simple examples are presented. The transmissibility analyses are conducted using a FEM code from where the matrices are extracted and imported to a routine, developed in Matlab environment, used to compute the transmissibility functions estimated by these two methods. The simulation times and accuracy obtained using these methods are presented and briefly discussed. The obtained results confirm the expected significant computational time reduction without loss of accuracy.

Keywords— Transmissibility functions, vibro-acoustic, finite element, computational effort, adjugate matrix.

1. INTRODUCTION

The transmissibility concept has been successfully applied to several problems. In [1, 2], the main definitions of vibrational transmissibility are presented for Multi-Degrees-of-Freedom (MDOF) mass-spring systems. These formulations were latter applied to beams [3-6]. The concept was then extended to acoustics, and used to analyse simplified aircraft interiors [7, 8]. A recent application of this concept is in estimating responses in vibro-acoustic systems [9].

The numerical analysis of transmissibility functions may be time-costly for systems with high number of Degrees of Freedom (DOFs) [7].

In this work is applied a numerical technique that uses only the necessary DOFs of the system, thereby decreasing the simulation time required to compute these transmissibilities.

Here, the transmissibility functions of structural, acoustic, and vibro-acoustic systems, are obtained using the FEM to obtain the global matrices.

The methodologies developed by previous authors [7, 9], used the entire inverse of the dynamic stiffness matrix to obtain the receptance matrix. However, only a

few entries of the receptance matrix are usually required to obtain the transmissibility. In this work, the authors use the required adjugate of the dynamic stiffness matrix to obtain the necessary entries of the receptance matrix.

The methodologies proposed reduces the computational effort required to obtain the steady-state transmissibility functions in the frequency domain. The effectiveness is evaluated by the comparison of simulation elapsed and CPU times. The simulation times obtained by using the adjugate of the dynamic stiffness matrix to obtain only the necessary entries of the receptance matrix are compared with the simulation times obtained by using the entire inverse of the dynamic stiffness matrix.

The reduction of the computational effort required to conduct the transmissibility analyses is essential in applications of the transmissibility concept. In addition, e.g., source identification in acoustic and vibro-acoustic systems require a considerable amount of computational effort. Therefore, the decrease of the computational effort is really relevant.

2. THE TRANSMISSIBILITY CONCEPT

In this section the theoretical fundamentals necessary to evaluate transmissibility functions in structural, acoustic and vibro-acoustic systems are presented.

2.1. Vibrational Transmissibility

The displacement transmissibility is described in [3], and involves the definition of a set of coordinates A where the forces F_A are applied, a set of coordinates U where the responses X_U are unknown, and a set of coordinates K where the responses X_K are known. Using these coordinate sets, one may write, in terms of the receptance matrix H , the following equations.

$$X_U = H_{UA} F_A \quad (1)$$

$$X_K = H_{KA} F_A \quad (2)$$

Eliminating F_A from the previous equations, one obtains

$$X_U = H_{UA} H_{KA}^+ X_K = T_{UK}^{A+} X_K \quad (3)$$

For the transmissibility of forces, considering a set of coordinates K of known applied loads F_K , and a set U of unknown reactions F_U , one may write

$$\begin{Bmatrix} X_K \\ X_U \\ X_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{KK} & H_{KU} \\ H_{UK} & H_{UU} \\ H_{CK} & H_{CU} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_K \\ F_U \end{Bmatrix} \quad (4)$$

where X_C are the responses at the remaining coordinates. Assuming that the responses X_U are equal to zero, one may obtain the transmissibility matrix in the following manner

$$F_U = -H_{UU}^{-1} H_{UK} F_K = T_{UK} F_K \quad (5)$$

2.2. Acoustic Transmissibility

An acoustic system can be modelled in the frequency domain by the following equation

$$(K_f - \omega^2 M_f + i\omega C_f) P(\omega) = Q(\omega) \quad (6)$$

where ω is the angular frequency, K_f and M_f are respectively the global stiffness and global mass matrices of the acoustic medium (fluid), P is the acoustic pressure amplitude vector and Q is the volume accelerator vector. Equation (6) can be rewritten using the frequency response matrix $[H(\omega)]$ in the following manner.

$$P(\omega) = H(\omega) Q(\omega) \quad (7)$$

Considering the three sets of coordinates illustrated in figure 2.1, one can obtain the pressure transmissibility. The set U is the set of coordinates where the pressures may be imposed, set K is the set of coordinates where the pressures are known, and set C is the set of the remaining coordinates.

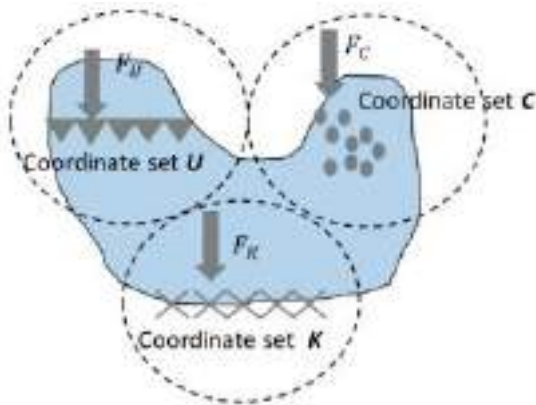


Figure 1. Schematic of the acoustic domain discretized in the sets of coordinates K , U and C [7].

Using these coordinate sets and assuming no loading in set C , one can rewrite equation (7) in the following manner

$$\begin{Bmatrix} P_K \\ P_U \\ P_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{KK} & H_{KU} \\ H_{UK} & H_{UU} \\ H_{CK} & H_{CU} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_K \\ Q_U \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Now, solving the second line for Q_U , substituting it in the first line and considering no loads in set K ($Q_K = 0$), the following expression is obtained for a given pressure P_U [7]:

$$P_K = H_{KU} H_{UU}^{-1} P_U = T_{UK} P_U \quad (9)$$

which defines a pressure transmissibility matrix T_{UK} .

2.3. Vibro-Acoustic Transmissibility

To determine the transmissibility matrix in a Fluid-Structure Interaction (FSI) one must use its coupled model - indicated by 'S' for solid part, 'a' for acoustic fluid part and 'C' the interface- where the finite element equation may be given by

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} K_S & K_C \\ 0 & K_a \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_S & 0 \\ 0 & C_a \end{bmatrix} \\ -\omega^2 \begin{bmatrix} M_S & 0 \\ -\rho_0 K_C^t & M_a \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ p_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{Si} \\ F_{ai} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

where K , M and C are the respective global stiffness, global mass and global damping matrices. The components u_i indicate nodal displacements, p_i the nodal pressures, F_{Si} the nodal loads in the solid part and F_{ai} the nodal loads in the acoustic fluid.

One may define the set of coordinates U where the displacements may be imposed, and the set of coordinates K where the pressure responses are known. Using the frequency response matrix and the described coordinate sets U and K , one may write the following equation [9].

$$\begin{Bmatrix} u_U \\ p_K \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{UU} & H_{UK} \\ H_{KU} & H_{KK} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_U \\ F_K \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Assuming that no forces are applied on K set ($F_K = 0$), one obtains the relation:

$$P_K = H_{KU} H_{UU}^{-1} u_U = T_{UK}^{FSI} u_U \quad (12)$$

where T_{UK}^{FSI} is the vibro-acoustic transmissibility matrix.

3. METHODOLOGIES

To determine the transmissibility functions, the authors use the Finite Element m (FE) model (using a comercial program e.g. ANSYS APDL) to define the geometries, physical properties and meshes of the model. The global matrices of the system are then extracted and imported to Matlab where the transmissibility functions are computed.

3.1. Inverse Matrix Method

Using the global matrices K , C and M extracted from the FEM analysis, one can obtain the dynamic stiffness matrix Z

$$Z(\omega) = K - \omega^2 M + i\omega C \quad (13)$$

Then, the frequency response matrix may be obtained by

$$H(\omega) = Z(\omega)^{-1} \quad (14)$$

After selecting the necessary entries of the receptance matrix, one may obtain the transmissibility matrix. Therefore, this method may be applied using the following steps:

- Import the global matrices from ANSYS to Matlab;
- Use the imported matrices to obtain the dynamic stiffness matrix Z ;
- Create a cycle to run a certain frequency range. Within the cycle, obtain the H matrix by using the $H=inv(Z)$ command, and the submatrices H_{UU} and H_{KU} by selecting the necessary entries of H . Then, the transmissibility matrix is computed using the respective equation (5, 9 or 12).

This method extracts the entire receptance matrix when only a few entries are needed. Therefore, one is extracting unnecessary data and using additional computational effort.

3.2. Adjugate Matrix Method

One alternative to the previous method is to use the adjugate of Z to extract only the necessary entries of H .

The adjugate of a certain square matrix $A_{n \times n}$ may be determined by the transpose of the co-factors matrix,

$$adj(A) = C^T = ((-1)^{i+j} M_{ij})^T \quad (15)$$

M_{ij} is the determinant of the $(n-1) \times (n-1)$ matrix that results from deleting row j and column i from A . The adjugate of A is related to its inverse in the following manner

$$A^{-1} = \frac{adj(A)}{|A|} \quad (16)$$

To obtain the entries of the adjugate matrix of Z in Matlab, one must take the following steps:

- Obtain the determinant of Z ;
- Create a Z_{aux} matrix equal to Z and remove the row j and column i from this new matrix;
- Compute the determinant of the resultant Z_{aux} matrix;
- Use (16) to obtain the required entry of H ;
- Repeat the process until needed entries have been computed.

Then, the transmissibility matrix is computed using the respective equation (5, 9 or 12). This calculation requires less computational time, but is subjected to possible overflows. To overcome this issue one may use a scaling of the matrix, but for large matrices one proposes to work with the logarithm of the determinant based on the LU decomposition of the matrix

$$\log(|\det(A)|) = \log(|u_{11}|) + \log(|u_{22}|) + \dots + \log(|u_{nn}|) \quad (16)$$

to obtain the entry of the receptance matrix by

$$H_{ij} = 10^{\log(|\det(Z_{aux})|) - \log(|\det(Z)|)} \quad (17)$$

To keep the signal of the determinant, one needs to count the number of negative entries in the diagonal of U .

4. RESULTS AND DISCUSSION

Here one presents the results obtained using the two numerical approaches described in section 3.

4.1. Acoustic Transmissibility

This example concerns an acoustic tube similar to the one presented in [9]. The tube illustrated in Fig. 2 is 4 m long, 0.1 m wide, and is filled with an acoustic fluid. The mass density of the fluid is 1.21 kg/m^3 , the boundary admittance is set to 0, and the sound speed is considered to be 344 m/s. The boundaries are rigid and reflective and no FSI are considered. The model is constructed in ANSYS using FLUID30 FEs. The FEs have 0.04 m lengthwise. A 1 Pa pressure is imposed at one of the ends and the pressure response is measured at the mid-section of the tube along the center line.



Figure 2. Schematics of the fully discretized acoustic tube.

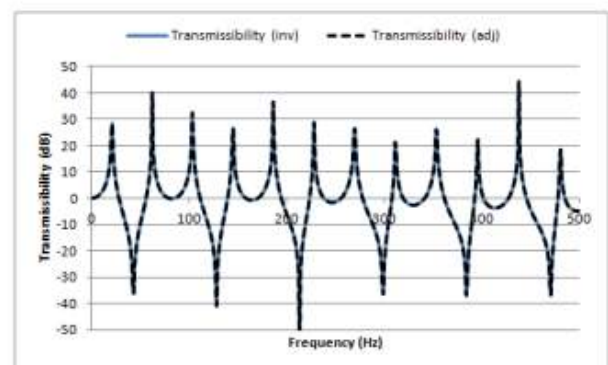


Figure 3. Acoustic transmissibilities (both methods).

Both methods present the same results (see transmissibilities in Figure3), but using the adjugate of Z it is possible to extract only the necessary entries (in this case only two entries are needed) of H instead of the entire

matrix. In table 1 the simulation times needed to compute the transmissibility functions are presented .

Inverse(Z)	2	43.390
	3	44.061

Table 1. Times to obtain transmissibility (Z is a 909×909)

		CPU Time [s]
Adjugate(Z)	1	3.688
	2	3.679
	3	3.687
Inverse(Z)	1	424.151
	2	428.396
	3	426.517

4.2. Vibro-Acoustic Transmissibility

This example concerns a vibro-acoustic tube discretized with FLUID30 and SHELL181 FEs. The geometry of the tube is the same as in the previous example, but an elastic plate is introduced at one end of the tube. The physical properties of the acoustic fluid are the same as in the previous example, and the structural plate has a mass density of 7800 kg/m³, a Young's modulus of 210 GPa, a Poisson coefficient of 0.3 and a thickness of 1 mm.

The system is discretized with 24 FEs per wavelength (as in [9]), and an FSI is defined in the FEs that are touching the plate according to [10]. As this model keeps the center line along the length of the tube, an 1 N harmonic load is imposed at the center of the plate, and the pressure response is obtained at the mid-section of the tube, along the center line. The displacement and rotation DOFs are considered to be fixed along the edges of the plate.

The transmissibility function (Fig.4) is thereby obtained between the node where the pressure response is measured, and the node where the load is imposed.

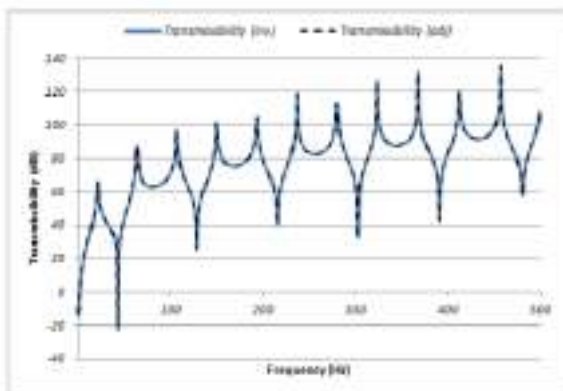


Figure 4. : Vibroacoustic transmissibilities (both methods).

The simulation times obtained with both methods are presented in table 2. The Z matrix is a 501×501 matrix.

Table 2. Times to obtain transmissibility

		CPU Time [s]
Adjugate(Z)	1	2.072
	2	2.088
	3	2.065
	1	48.394

Table 2 shows that using the adjugate of Z can save a significant amount of simulation time when obtaining the transmissibility functions in a vibro-acoustic system.

5. CONCLUSIONS

The computation of transmissibility functions in acoustic and vibro-acoustic systems by using the full inverse of the dynamic stiffness matrix proves to be a time consuming and inefficient method. This approach uses unnecessary data and increases significantly the simulation time. The use of the adjugate matrix proves to be a reliable alternative to this method. It allows the user to obtain the same results, and to reduce the simulation time. In fact, by applying the method of the adjugate matrix to the problems discussed in the previous section, one was able to obtain the transmissibility functions more than twenty times faster. This is a significant improvement in the Matlab routines designed to evaluate transmissibility functions in acoustic and vibro-acoustic MDOF systems.

One major problem that arises from using the adjugate matrix to analyse transmissibilities, is the overflow in the determinants. For larger matrices, the determinants of the dynamic stiffness matrices tend to surpass the precision of Matlab. However, the methodologies described present some possible solutions to this problem.

The advances presented in terms of reducing the computational effort required to conduct acoustic and vibro-acoustic transmissibility analyses may also be extended to the field of vibrational transmissibility, in particular to the transmissibility of forces in structural systems. In addition, the methodologies presented enable the analysis of larger or more refined systems, and help in the solution of more complex problems, such as the problem of source identification in acoustic and vibro-acoustic MDOF systems.

In conclusion, this work presents a simple methodology to reduce the computational effort required to evaluate transmissibility functions in acoustic and vibro-acoustic systems, and the results presented prove its effectiveness. Furthermore, the advances achieved with this work are considered to be a relevant contribution to the field of transmissibility and, more specifically, to the field of vibro-acoustic transmissibility, which remains, to this day, relatively undeveloped.

ACNOWLEDGMENT

This work was supported by FCT, through IDMEC, under LAETA, Project UIDB/50022/2020.

6. REFERENCES

[1] M. M. Neves and N. M. M. Maia. Estimation Of Applied Force Using The Transmissibility Concept. In Proceedings of ISMA2010 Including USD2010, Pages 3887-3898, 2010.

- [2] N. M. M. Maia, A. P. V. Urgueira, and R. A. B. Almeida. Whys and Wherefores of Transmissibility. In D. F. Beltran-Carbajal, editor, *Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments*, chapter 10, Pages 187-216, ISBN 978-953-307-433-7, September 2011.
- [3] Y. E. Lage, M. M. Neves, N. M. M. Maia, and D. Tcherniak. Force transmissibility versus displacement transmissibility. *Journal of Sound and Vibration*, Pages 5708-5722, DOI: 10.1016/j.jsv.2014.05.038, 2014.
- [4] Y. Lage, N. Maia, M. M. Neves. Force Magnitude Reconstruction Using the Force Transmissibility Concept. *Shock and Vibration*, Volume 2014, Pages 1-9, DOI: 10.1155/2014/905912, 2014.
- [5] N. M. M. Maia, Y. E. Lage, M. M. Neves. Recent Advances on Force Identification in Structural Dynamics. In D. F. Beltran-Carbajal, editor, *Advances in Vibration and Structural Dynamics*, chapter 6, Pages 103-132, ISBN 978-953-51-0845-0, DOI: 10.5772/3421, December 2012.
- [6] Y. Lage, N. Maia, M. M. Neves, A. Ribeiro. A Force Identification Approach for Multiple Degree of Freedom Systems. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics, Series 4*, DOI: 10.1007/978-1-4419-9831-6_7, 2010
- [7] C. D. V. Guedes. *Localização de Fontes Acústicas em Interiores de Avião Usando o Conceito de Transmissibilidade*, Master Thesis (in Portuguese), Instituto Superior Técnico, 2016.
- [8] C. D. V. Guedes and M. M. Neves. A model-based acoustic source localization using the MDOF transmissibility concept. In *Proceedings of the EuroRegio 2016*, June 13-15, Porto, Portugal 2016.
- [9] V. M. N. Martins. *Estimating Vibration, Acoustic and Vibro-Acoustic responses using Transmissibility functions*, Master Thesis, Instituto Superior Tecnico, 2019.
- [10] C. Howard. *Coupled Structural-Acoustic Analysis Using ANSYS*. Internal Report, The University of Adelaide, Department of Mechanical Engineering, Pages 1-15, 2000.

ACOPLAMENTO ITERATIVO DE PROBLEMAS ACÚSTICO-POROELÁSTICOS

Kleber De Almeida Gonçalves^{1}*

Luis Manuel Godinho¹

Delfim Soares Jr²

Pedro Alves Costa³

¹ University of Coimbra, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Coimbra, Portugal

² Structural Engineering Department, Federal University of Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brazil.

³ Faculty of Engineering of the University of Porto, CONSTRUCT, Porto, Portugal

RESUMO

Este artigo apresenta uma estratégia numérica para analisar problemas acoplados acústico-poroelásticos em domínios finitos. Ele descreve uma formulação de acoplamento iterativo usando o Método dos Elementos Finitos (MEF). O procedimento iterativo adotado resolve cada subdomínio separadamente, atualizando as condições de contorno nas interfaces compartilhadas até a convergência. Um parâmetro de relaxação é incluído, e valores ótimos são calculados. Esta abordagem permite discretizações independentes, resultando em sistemas de equações menores e melhor condicionados. Resultados numéricos demonstram a eficácia da técnica de solução proposta.

ABSTRACT

This paper presents a numerical strategy for analyzing coupled acoustic-poroelastic problems in finite domains. It describes an iterative coupling formulation using the Finite Element Method (FEM). The adopted iterative procedure solves each subdomain separately, updating variables at shared interfaces until convergence. A relaxation parameter is included, and optimal values are derived. This approach allows for independent discretizations, leading to smaller and better-conditioned systems of equations. Numerical results demonstrate the effectiveness of the proposed solution technique.

Palavras Chave — *Método de Elementos Finitos, acoplamento iterativo, acústico, poroelástico*

1. INTRODUÇÃO

Conforme destacado por Zienkiewicz e Taylor [1], a análise de sistemas acoplados é uma questão crucial e pode ser categorizada sob dois principais enfoques: (i) sistemas em que o acoplamento ocorre nas interfaces dos domínios, através da imposição de condições de contorno, em que cada domínio descreve uma situação física ou um processo de discretização distinto; e (ii) sistemas em que o acoplamento é realizado através de domínios que se sobrepõem, por intermédio de equações diferenciais que governam fenômenos físicos diversos.

Neste estudo, focamos em um modelo altamente abrangente que lida com sistemas acoplados, nos quais os domínios sobrepostos (meio poroso [2]) são acoplados aos domínios adjacentes (acústico [3]) por meio de condições de interface. Essa abordagem permite a consideração de uma ampla gama de fenômenos físicos que interagem de maneira intrínseca no sistema analisado.

A importância de tal abordagem é evidente em várias disciplinas da engenharia, principalmente na geofísica, onde a capacidade de realizar análises abrangentes é essencial. Isso se torna particularmente relevante ao considerarmos a modelagem numérica de formações porosas, que frequentemente exibem comportamentos muito mais complexos do que materiais puramente elásticos. Essa complexidade é inerente à interação multifacetada entre os componentes sólidos e fluidos presentes nos sistemas em estudo.

A formulação poroelástica surge como uma ferramenta poderosa, permitindo a incorporação natural de propriedades físicas essenciais, como porosidade e permeabilidade de rochas, que não podem ser adequadamente consideradas em modelos estritamente elásticos. A teoria desenvolvida por Maurice A. Biot [4, 5], relacionada à propagação de ondas em meios poroelásticos saturados com fluido, desempenha um

* *Autor de contacto:* kleber.a.g@hotmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

papel fundamental. Essa teoria aplica os princípios da mecânica do contínuo para descrever o comportamento conjunto do esqueleto elástico e do fluido viscoso presentes nos poros, em uma escala macroscópica.

É importante enfatizar que a análise numérica de sistemas acoplados, como os modelos que interagem nos domínios acústico e porodinâmico, representa um desafio substancial. Isso se deve à necessidade de abordar adequadamente os subdomínios em que diferentes fenômenos físicos estão envolvidos e à complexidade da modelagem numérica da propagação de ondas através de interfaces com formas variadas e intrincadas.

Para lidar com essa complexidade, adotamos o método dos elementos finitos [6, 7, 2]. Essa abordagem é aplicada de forma abrangente na discretização dos subdomínios acústicos e porodinâmicos, permitindo uma representação precisa dos fenômenos físicos envolvidos.

Dessa forma, este trabalho visa aprofundar o entendimento e capacidade de análise de sistemas complexos e interativos, com foco em sistemas acoplados que abrangem componentes acústicos e porodinâmicos.

Essa abordagem de modelagem e análise de sistemas acoplados tem uma ampla gama de aplicações em situações reais de engenharia. Por exemplo, na análise de fundações para máquinas vibratórias, como as usadas em plantas industriais, a compreensão do acoplamento entre meios porosos e acústicos é essencial para evitar excessos de ruídos. Além disso, em projetos de barragens e diques que tem a ligação entre fluido e solo, a análise acústico-porodinâmica desempenha um papel fundamental na previsão de comportamentos complexos. Esses são apenas alguns exemplos de como essa abordagem de sistemas acoplados é aplicada com sucesso em situações reais de engenharia, demonstrando sua relevância e impacto prático.

2. EQUAÇÕES GOVERNANTES

Nesta seção, são brevemente apresentadas as equações fundamentais que governam os subdomínios acústico e poroelástico do modelo acoplado em foco, bem como suas relações de interface. Nas seções subsequentes, discutiremos o tratamento numérico desses modelos teóricos.

2.1. Meio Acústico

A equação da onda acústica, também conhecida como equação de Helmholtz, pode ser formulada da seguinte maneira, expressa com notação indicial [3]:

$$p(X, \omega)_{,ii} + \gamma^2 p(X, \omega) + s(X, \omega) = 0 \quad (2.1)$$

onde, $p(X, \omega)$ e $s(X, \omega)$ representam, respectivamente, a pressão hidrodinâmica e as distribuições de fontes no domínio. O termo γ é definido como o número complexo de onda, calculado como $\gamma = \sqrt{\omega^2/C^2}$, onde $C = \sqrt{k/\rho}$ é a velocidade de propagação da onda, ρ é a densidade e k descreve a compressibilidade do meio.

As condições de contorno para o problema acústico podem ser estabelecidas da seguinte forma:

$$p(X, \omega) = \bar{p}(X, \omega), \text{ para } X \in \Gamma_1 \quad (2.2)$$

$$q(X, \omega) = p_{,j}(X, \omega)n_j(X) = \bar{q}(X, \omega), \text{ para } X \in \Gamma_2 \quad (2.3)$$

onde, os valores prescritos são indicados por barras, e $q(X, \omega)$ representa o fluxo ao longo da fronteira, com suas componentes do vetor normal representadas por $n_j(X)$. A fronteira do modelo é descrita pela união de Γ_1 e Γ_2 , onde Γ_1 representa as partes essenciais (ou de Dirichlet) e Γ_2 as partes naturais (ou de Neumann) da fronteira, com $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = 0$.

2.2. Meio Poroelástico

As equações governantes para um modelo poroelástico (formulação **u-p**) podem ser expressas como se segue [2]. A equação de equilíbrio de momento no meio acoplado é dada por:

$$\sigma_{ij}(X, \omega)_{,j} + \omega^2 \rho_m u_i(X, \omega) + b_i(X, \omega) = 0 \quad (2.4)$$

e a equação de equilíbrio de massa e momento para o fluido intersticial é representada por:

$$\begin{aligned} -i\omega\alpha\varepsilon_{ii}(X, \omega) - (\kappa p_{,i}(X, \omega))_{,i} \\ - i\omega(1/Q^*)p(X, \omega) \\ + s(X, \omega) = 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Na equação (2.4), $\sigma_{ij}(X, \omega)$ descreve as tensões totais do modelo, onde as tensões efetivas são definidas como $\sigma'_{ij}(X, \omega) = \sigma_{ij}(X, \omega) + \alpha \delta_{ij} p(X, \omega)$, sendo α o parâmetro de Biot, $p(X, \omega)$ a pressão do fluido intersticial nos poros, e δ_{ij} o delta de Kronecker. Além disso, $u_i(X, \omega)$ representa o deslocamento da matriz sólida, $b_i(X, \omega)$ descreve a força no domínio, e $\rho_m = \eta\rho_f + (1 - \eta)\rho_s$ representa a densidade de massa da mistura, onde ρ_s e ρ_f são as densidades de massa das fases sólida e fluida, respectivamente, e η representa a porosidade do meio.

A equação (2.5) considera o tensor de deformação $\varepsilon_{ij}(X, \omega)$, o coeficiente de permeabilidade κ definido de acordo com a lei de permeabilidade de Darcy, os termos de fonte do domínio $s(X, \omega)$, e o parâmetro de mistura Q^* , definido como $(1/Q^*) = \eta/K_f + (\alpha - \eta)/K_s$, onde os módulos de volume das fases sólida e fluida são representados por K_s e K_f , respectivamente.

As condições de contorno para o problema poroelástico podem ser estabelecidas considerando poro-pressões prescritas (Eq. 2.2) ou fluxos (Eq. 2.3), bem como deslocamentos prescritos (Eq. 2.6) ou trações totais (Eq. 2.7):

$$u_i(X, \omega) = \bar{u}_i(X, \omega), \text{ para } X \in \Gamma_1 \quad (2.6)$$

$$\tau_i(X, \omega) = \sigma_{ij}(X, \omega)n_j(X) = \bar{\tau}_i(X, \omega), \text{ para } X \in \Gamma_2 \quad (2.7)$$

2.3. Interfaces Comuns

No contexto do acoplamento entre um sólido poroelástico (denotado pelo sobrescrito “P”) e um fluido acústico (denotado pelo sobrescrito “A”) [9], quando se trata de uma

interface selada, o fluido acústico e o fluido poroso não estão hidráulicamente conectados. Portanto, a pressão do fluido sofre uma descontinuidade e não há fluxo de fluido através da interface. Como resultado, as condições de acoplamento assumem a seguinte forma:

$$\sigma_{ij}^P(X, \omega)n_j(X) = -p^A(X, \omega)n_i(X) \quad (2.8)$$

$$u_j^P(X, \omega)n_j(X) = \frac{1}{\rho\omega^2}p_{,j}^A(X, \omega)n_j(X) \quad (2.9)$$

$$p_{,j}^P(X, \omega)n_j(X) = 0 \quad (2.10)$$

A equação (2.8) descreve a transferência de tensão entre o sólido poroelástico e o fluido acústico. Aqui, $\sigma_{ij}^P(X, \omega)$ representa o estresse de Cauchy total experimentado pelo sólido poroelástico, enquanto $p^A(X, \omega)$ representa o campo de pressão acústica. Essa equação garante que o equilíbrio de tensão seja mantido através da interface, permitindo a transferência de tensão entre os dois meios.

A equação (2.9) relaciona o deslocamento normal do sólido poroelástico com o gradiente de pressão acústica. Aqui, $u_j^P(X, \omega)n_j(X)$ representa o deslocamento normal do sólido poroelástico na interface e $p_{,j}^A(X, \omega)n_j(X)$ representa o gradiente espacial projetado da pressão acústica, i.e., o fluxo normal à interface. A equação mostra como perturbações acústicas resultam em movimento no meio poroelástico.

Por último, a equação (2.10) estabelece que o fluxo normal do fluido poroso dentro do sólido poroelástico, representado por $p_{,j}^A(X, \omega)n_j(X)$, deve ser anulado na interface. Neste cenário de interface selada, não há fluxo de fluido entre os dois meios, e essa condição reflete essa ausência de fluxo.

3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Nesta seção, faremos uma breve introdução às equações fundamentais para a modelagem acústica e porodinâmica utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF).

3.1. Modelagem Acústica

O conjunto de equações no domínio da frequência resultante da discretização espacial por meio de elementos finitos do modelo acústico mencionado na Seção 2.1 é expresso por [6]:

$$\mathbf{K}_A \mathbf{P}(X, \omega) - \omega^2 \mathbf{M}_A \mathbf{P}(X, \omega) = \mathbf{F}_A \quad (3.1)$$

onde \mathbf{M} e \mathbf{K} representam as matrizes de massa e rigidez do modelo, respectivamente, enquanto \mathbf{F} e \mathbf{P} são vetores de excitações nodais e pressão hidrodinâmica, respectivamente (o subscrito A refere-se ao subdomínio acústico). As matrizes e vetores envolvidos na Eq. (3.1) são definidas no nível do elemento da seguinte forma:

$$\mathbf{M}_A = \int_{\Omega} \mathbf{N}_A^T \rho_A \mathbf{N}_A d\Omega \quad (3.2)$$

$$\mathbf{K}_A = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_A)^T k_A (\nabla \mathbf{N}_A) d\Omega \quad (3.3)$$

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{T}_A + \mathbf{Y}_A = \int_{\Gamma} \mathbf{N}_A^T k_A \bar{q}_A d\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{N}_A^T s_A d\Omega \quad (3.4)$$

Neste contexto, \mathbf{N} e ∇ representam o vetor de interpolação e o operador de gradiente, respectivamente, enquanto \bar{q}_A e s denotam excitações de superfície e domínio, respectivamente. Além disso, conforme descrito na Eq. (3.4), \mathbf{T} e \mathbf{Y} referem-se às contribuições vetoriais nodais correspondentes.

3.2. Modelagem Porodinâmica

Considerando as práticas convencionais do método dos elementos finitos e a introdução de aproximações espaciais para os deslocamentos e pressões do modelo poroso, podemos derivar o seguinte conjunto de equações no domínio de frequência, tendo em vista o modelo poroelástico descrito na Seção 2.2 [2]:

$$\mathbf{K}_P \mathbf{U}(X, \omega) - \omega^2 \mathbf{M}_P \mathbf{U}(X, \omega) - \mathbf{Q}_P \mathbf{P}(X, \omega) = \mathbf{F}_P^s \quad (3.5)$$

$$\mathbf{H}_P \mathbf{P}(X, \omega) + \omega i \mathbf{S}_P \mathbf{P}(X, \omega) + \omega i \mathbf{Q}_P^T \mathbf{U}(X, \omega) = \mathbf{F}_P^f \quad (3.6)$$

onde as matrizes \mathbf{K} , \mathbf{M} , \mathbf{H} , \mathbf{S} e \mathbf{Q} representam as matrizes de rigidez, massa, permeabilidade, compressibilidade e acoplamento do modelo, respectivamente. As variáveis \mathbf{U} e \mathbf{P} representam os vetores de deslocamento e poro-pressão, respectivamente. Os vetores \mathbf{F} denotam as excitações nodais (onde o subscrito P refere-se ao subdomínio poroelástico).

Os componentes das matrizes e vetores, conforme expressos nas equações (3.5) e (3.6), são determinados, em nível do elemento, da seguinte forma:

$$\mathbf{M}_P = \int_{\Omega} \mathbf{N}_s^T \rho_m \mathbf{N}_s d\Omega \quad (3.7)$$

$$\mathbf{K}_P = \int_{\Omega} \mathbf{B}_s^T \mathbf{D}_s \mathbf{B}_s d\Omega \quad (3.8)$$

$$\mathbf{Q}_P = \int_{\Omega} \mathbf{B}_s^T \alpha \mathbf{m} \mathbf{N}_f d\Omega \quad (3.9)$$

$$\mathbf{F}_P^s = \mathbf{T}_P^s + \mathbf{Y}_P^s = \int_{\Gamma} \mathbf{N}_s^T \bar{\tau}_s d\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{N}_s^T \mathbf{b}_s d\Omega \quad (3.10)$$

$$\mathbf{H}_P = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_f)^T \kappa_f (\nabla \mathbf{N}_f) d\Omega \quad (3.11)$$

$$\mathbf{S}_P = \int_{\Omega} \mathbf{N}_f \frac{1}{Q^*} \mathbf{N}_f d\Omega \quad (3.12)$$

$$\mathbf{F}_p^f = \mathbf{T}_p^f + \mathbf{Y}_p^f = \int_{\Gamma} \mathbf{N}_f^T \kappa_f \bar{q}_f d\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{N}_f^T s_f d\Omega \quad (3.13)$$

Estas equações seguem o esquema de notação previamente estabelecido, e $\mathbf{m} = [1 \ 1 \ 0]^T$ é uma representação vetorial do delta de Kronecker. O super/subscrito f refere-se à fase do fluido do meio poroso, enquanto o s refere-se à fase sólida.

4. ACOPLAMENTO ITERATIVO

Para viabilizar o acoplamento entre diversos subdomínios físicos distintos, empregamos uma abordagem iterativa que atualiza as variáveis pertinentes nas interfaces compartilhadas. Essa estratégia se baseia na imposição de condições de contorno nas interfaces em comum. Cada subdomínio é analisado de maneira independente, e seus sistemas de equações são resolvidos separadamente para cada frequência durante o processo iterativo. Isso nos permite utilizar discretizações independentes em cada subdomínio, eliminando a necessidade de nós coincidentes nas interfaces compartilhadas.

A fim de garantir a convergência e agilizar o processo iterativo, introduzimos um parâmetro de relaxamento, denominado λ , no algoritmo de acoplamento iterativo. A seleção apropriada e a estratégia para esse parâmetro desempenham um papel fundamental na prevenção de iterações excessivas ou mesmo de falhas na convergência. O parâmetro de relaxamento é aplicado às variáveis fundamentais em todas as interfaces possíveis (conforme detalhado na seção 2.4), assegurando sua presença em todas as interfaces enquanto o mesmo é calculado globalmente.

4.1. Acoplamento de Meios Acústicos e Poroelásticos

Dentro do contexto do modelo de interação entre meios acústicos e poroelásticos, as condições de contorno nas interfaces de acoplamento, como definidas nas equações (2.8) a (2.10), são fundamentais para a integração dos dois domínios físicos. Nesse caso, são impostas condições naturais nas interfaces compartilhadas em cada subdomínio. Isso significa que os deslocamentos calculados nos subdomínios poroelásticos são utilizados para determinar os fluxos nos subdomínios acústicos (como indicado na Equação (2.9)), e as pressões hidrodinâmicas calculadas nos subdomínios acústicos são usadas para derivar as trações nos subdomínios poroelásticos (conforme a Equação (2.8)). Vale ressaltar que, neste estudo, não consideramos nenhum fluxo de fluido através da interface de acoplamento, conforme especificado na Equação (2.10).

Introduzimos um parâmetro de relaxamento para atualizar as pressões hidrodinâmicas avaliadas nos subdomínios acústicos (expressas como ${}^I\mathbf{P}_A^{(k+\lambda)}(w)$), conforme a equação abaixo:

$${}^I\mathbf{P}_A^{(k+1)}(w) = (\lambda) {}^I\mathbf{P}_A^{(k+\lambda)}(w) + (1 - \lambda) {}^I\mathbf{P}_A^{(k)}(w) \quad (4.1)$$

Dessa forma, seguimos com a resolução independente de cada subdomínio do modelo acoplado, calculando ${}^I\mathbf{U}_P^{(k+1)}(w)$, ${}^I\mathbf{P}_P^{(k+1)}(w)$ e ${}^I\mathbf{P}_A^{(k+1)}(w)$ em cada etapa iterativa. As relações de interface, que utilizam ${}^I\mathbf{U}_P^{(k+1)}(w)$ para avaliar ${}^I\mathbf{T}_A^{(k+1)}(w)$ e ${}^I\mathbf{P}_A^{(k+1)}(w)$ para estabelecer ${}^I\mathbf{T}_P^{(k+1)}(w)$, são consideradas iterativamente até que convergência seja alcançada.

4.2. Discretização Espacial Desconexa

Quando aplicamos a discretização espacial em cada sub-região resultante de uma malha descontínua na interface, precisamos lidar com a interpolação das condições de contorno. Essas condições de contorno podem ser espacialmente interpoladas usando funções de forma existentes. A Equação (4.2) descreve esse processo de interpolação, fornecendo uma interpolação da condição ${}^I\mathbf{P}_A^{(k+1)}(w)$ em uma posição necessária \bar{X} , denominada ${}^I\mathbf{P}'_A^{(k+1)}(w)$.

$${}^I\mathbf{P}'_A^{(k+1)}(w) = \int_{\Gamma_I} \delta(X - \bar{X}) \mathbf{N}_A(X) d\Gamma {}^I\mathbf{P}_A^{(k+1)}(w) \quad (4.2)$$

onde δ corresponde a uma representação da função Delta de Dirac.

Nesse contexto, a excitação nodal ${}^I\mathbf{T}_P^{s(k+1)}(w)$ é determinada por meio da integração de ${}^I\mathbf{P}'_A^{(k+1)}(w)$, como expresso na Equação (4.3), onde \mathbf{n} representa o vetor normal à interface (conforme especificado pela relação (2.8)).

$${}^I\mathbf{T}_P^{s(k+1)}(w) = - \int_{\Gamma_I} \mathbf{N}_S^T(X) \mathbf{n}(X) \mathbf{N}_f(X) d\Gamma {}^I\mathbf{P}'_A^{(k+1)}(w) \quad (4.3)$$

De forma análoga, pode-se obter ${}^I\mathbf{T}'_A^{(k+1)}(w)$ a partir de ${}^I\mathbf{U}_P^{(k+1)}(w)$ no caso de interfaces desconexas, tendo-se em consideração a expressão (2.9).

4.3. Parâmetro de Relaxamento λ

O parâmetro de relaxamento, λ , é determinado por meio da minimização da função de erro [8]:

$$f(\lambda) = \left\| {}^I\mathbf{P}_A^{(k+1)}(\lambda) - {}^I\mathbf{P}_A^{(k)}(\lambda) \right\|^2 \quad (4.4)$$

No contexto do acoplamento mencionado, o parâmetro de relaxamento é aplicado para garantir a convergência e/ou acelerar o processo nas condições essenciais de contorno ${}^I\mathbf{P}_A(w)$. Ele é calculado com base nas iterações $(k+1)$ e (k) .

Usando a equação (4.1), podemos expressar as seguintes equações (4.5) e (4.6):

$${}^I P_A^{(k+1)} = \lambda {}^I P_A^{(k+\lambda)} + (1 - \lambda) {}^I P_A^{(k)} \quad (4.5)$$

$${}^I P_A^{(k)} = \lambda {}^I P_A^{(k+\lambda-1)} + (1 - \lambda) {}^I P_A^{(k-1)} \quad (4.6)$$

Ao substituir as equações (4.5) e (4.6) na equação (4.4) acima, obtemos:

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= \left\| (\lambda) \mathbf{W}^{(k+\lambda)} + (1 - \lambda) \mathbf{W}^{(k+\lambda)} \right\|^2 \\ &= (\lambda^2) \left\| \mathbf{W}^{(k+\lambda)} \right\|^2 \\ &\quad + 2\lambda(1 - \lambda) (\mathbf{W}^{(k+\lambda)}, \mathbf{W}^{(k)}) \\ &\quad + (1 - \lambda)^2 \left\| \mathbf{W}^{(k)} \right\|^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Nessa equação, a definição de produto interno usada é $(\mathbf{W}, \mathbf{W}) = \|\mathbf{W}\|^2$ e $\mathbf{W}^{(k+\lambda)} = {}^I P_A^{(k+\lambda)} - {}^I P_A^{(k+\lambda-1)}$.

Para encontrar o valor ótimo de λ que minimiza $f(\lambda)$, diferenciamos a equação (4.7) em relação a λ e igualamos o resultado a zero, resultando em:

$$\begin{aligned} \lambda \left\| \mathbf{W}^{(k+\alpha)} \right\|^2 + (1 - 2\lambda) (\mathbf{W}^{(k+\lambda)}, \mathbf{W}^{(k)}) \\ + (\lambda - 1) \left\| \mathbf{W}^{(k)} \right\|^2 = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Ao rearranjar a equação acima, obtemos o valor ótimo de λ :

$$\lambda = \frac{(\mathbf{W}^{(k)}, \mathbf{W}^{(k)} - \mathbf{W}^{(k+\alpha)})}{\left\| \mathbf{W}^{(k)} - \mathbf{W}^{(k+\alpha)} \right\|^2} \quad (4.9)$$

Essa expressão é eficiente computacionalmente e fácil de implementar, fornecendo um valor ótimo para o parâmetro de relaxamento λ em cada etapa iterativa. Vale destacar que o parâmetro de relaxamento calculado é um número complexo, uma vez que o problema é formulado no domínio da frequência. No entanto, para os casos discutidos aqui, é considerado um valor real inicial de $\lambda=0.5$, uma vez que o processo iterativo é relativamente insensível ao valor inicial do parâmetro de relaxamento.

5. EXEMPLO NUMÉRICO

Nesta seção, apresentaremos um exemplo prático para demonstrar o funcionamento da metodologia proposta. Neste exemplo, uma coluna heterogênea é analisada. No caso, a coluna é composta apenas por materiais poroelásticos e acústicos. Um esquema do modelo é mostrado na Figura 1. A superfície superior da coluna é considerada drenada e carregada de forma uniforme, levando em conta uma variação de tempo do tipo Heaviside com uma amplitude de $3 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$, como mostrado no domínio de frequência na Figura 2. As outras superfícies do modelo são não drenadas e têm deslocamentos normais prescritos iguais a zero.

Para facilitar a conversão entre os domínios de tempo e frequência e suas respectivas representações nas implementações convencionais da Transformada Rápida de Fourier (FFT), é crucial acrescentar uma zona silenciosa ao final do histórico de força preenchida com zeros. Essa prática, associada com a introdução de amortecimento ao modelo, é indispensável para a dissipação de vibrações livres após a atuação da força. O comprimento da zona silenciosa depende do período fundamental do sistema e da extensão do

amortecimento. Neste sentido é aqui utilizado o Exponential Window Method (EWM) [10], uma técnica usada para estabelecer de forma confiável a zona silenciosa desejada e combater a distorção de frequência (aliasing).

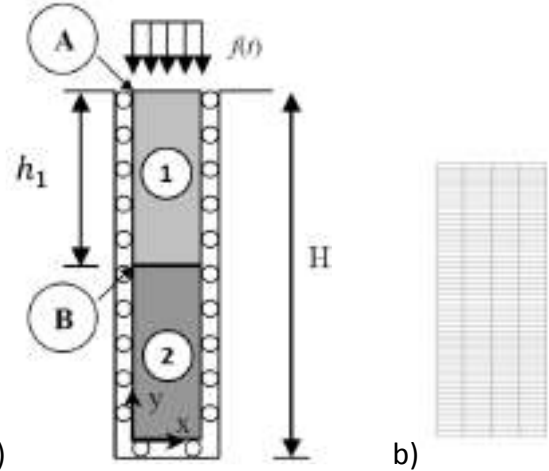


Figura 1 - Esquema da coluna acoplada: (a) modelo poro/acustico; (b) malha adotada de MEF para cada subdominio.

Infelizmente, não há uma solução analítica conhecida para o modelo poro/acústico acoplado em foco; no entanto, um modelo equivalente foi avaliado numericamente em [11]. As discretizações do MEF adotadas também são mostradas na Figura 1. As propriedades físicas do domínio acústico (meio 2) são $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ (densidade de massa) e $k = 2 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ (compressibilidade). Da mesma forma, as propriedades físicas do meio poroso incompressível (meio 1) são $\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3$ (densidade de massa da fase sólida), $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ (densidade de massa da fase fluida), $\eta = 0.3$ (porosidade) e $\kappa = 10^6 \text{ m}^4/\text{Ns}$ (permeabilidade). Valores zero são considerados para o coeficiente de Poisson do meio poroso e para $1/Q^*$. Para o módulo de Young, $E = 2 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ é adotado.

Os resultados no domínio de frequência para os deslocamentos verticais nos pontos A ($x = 0$ e $y = H$) da coluna (ver Figura 1) são apresentados na Figura 3a. As respostas transformadas para o domínio de tempo também são mostradas na Figura 3b, levando em consideração a resposta de referência [11], ilustrando a boa precisão dos resultados calculados. Da mesma forma, a Figura 4a apresenta o deslocamento do ponto B ($x = 0$ e $y = H/2$), e na Figura 4b, esses deslocamentos são apresentados no domínio do tempo e comparados novamente com [11]. Para o ponto B, é possível avaliar as poro-pressões na Figura 5a e depois também convertê-las para o domínio do tempo, conforme ilustrado na Figura 5b. Como pode ser observado, como esperado, pouca diferença é observada nas respostas em comparação com a resposta de referência, mesmo após os procedimentos de transformação de domínio.

A Figura 6 ilustra o desempenho do algoritmo de acoplamento iterativo. Esta figura descreve o número total de iterações para cada frequência. Como pode ser observado,

poucas etapas iterativas são necessárias para a convergência levando em consideração a formulação de acoplamento proposta, destacando a eficácia da técnica.

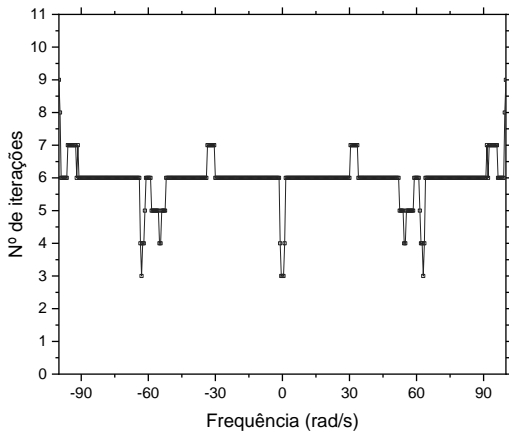
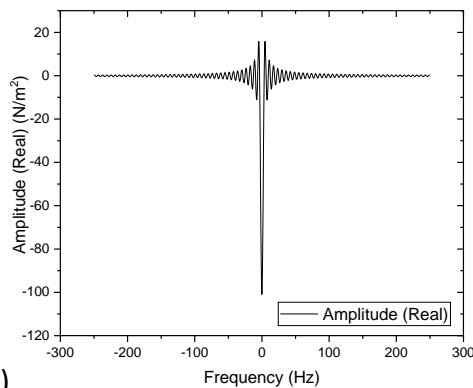


Figura 6 - Número de iterações por frequência.

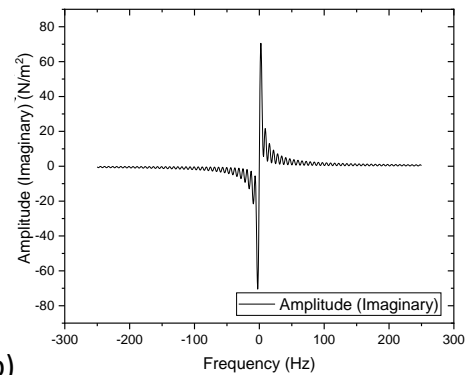
6. CONCLUSÃO

Neste artigo, discute-se uma metodologia robusta para a análise dinâmica de sistemas complexos acoplados. Foi apresentado um exemplo numérico para demonstrar a eficácia e versatilidade da abordagem apresentada. Nesse exemplo, uma coluna composta por materiais poroelásticos e acústicos é analisada. Através das avaliações numéricas, demonstra-se a precisão dos resultados calculados. O algoritmo de acoplamento iterativo provou ser altamente eficiente, requerendo apenas algumas etapas iterativas para convergência.

A capacidade desta metodologia de analisar de forma simples e eficiente a interação de diferentes domínios físicos e capturar com precisão suas respectivas respostas dinâmicas abre possibilidades para uma ampla gama de aplicações em engenharia estrutural, geotecnia e outras áreas onde interações multi-físicas desempenham um papel crucial. Pesquisas futuras nessa área podem refinar e expandir ainda mais esta abordagem, oferecendo insights ainda maiores sobre o comportamento de sistemas complexos.

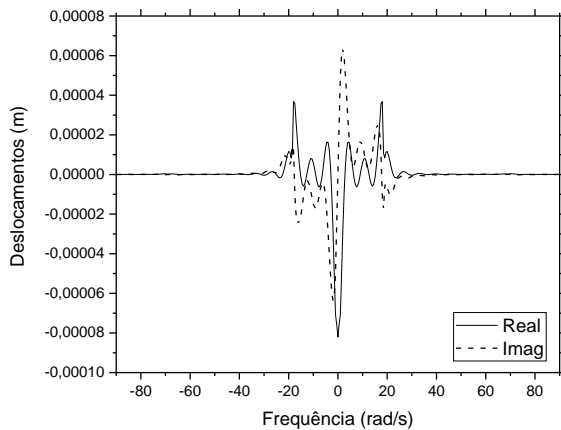


a)

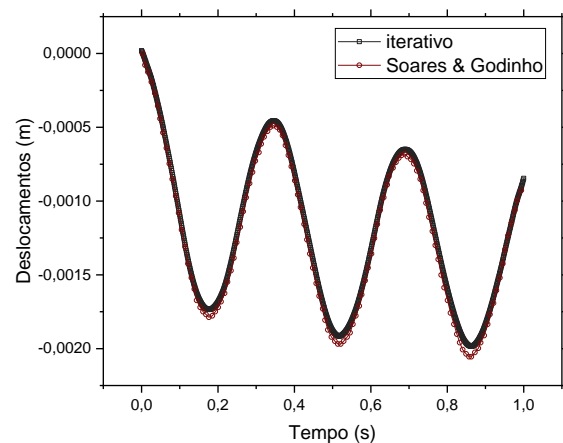


b)

Figura 2 - Carga uniforme transformada para o domínio de frequência, com amortecimento periódico (EWN): a) Parte real; b) Parte imaginária.



a)



b)

Figura 3 - Deslocamentos verticais do ponto A: (a) na frequência; (b) no tempo.

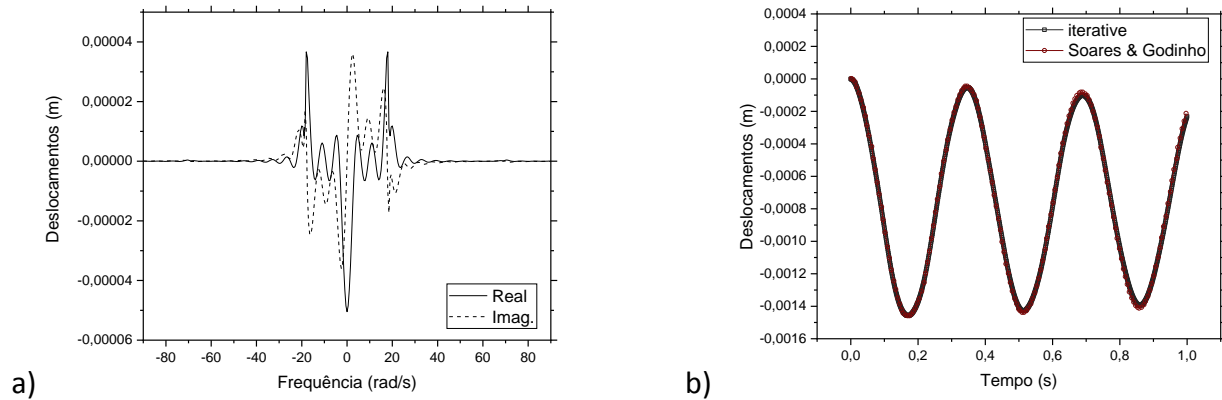


Figura 4 - Deslocamentos verticais do ponto B: (a) na frequência; (b) no tempo.

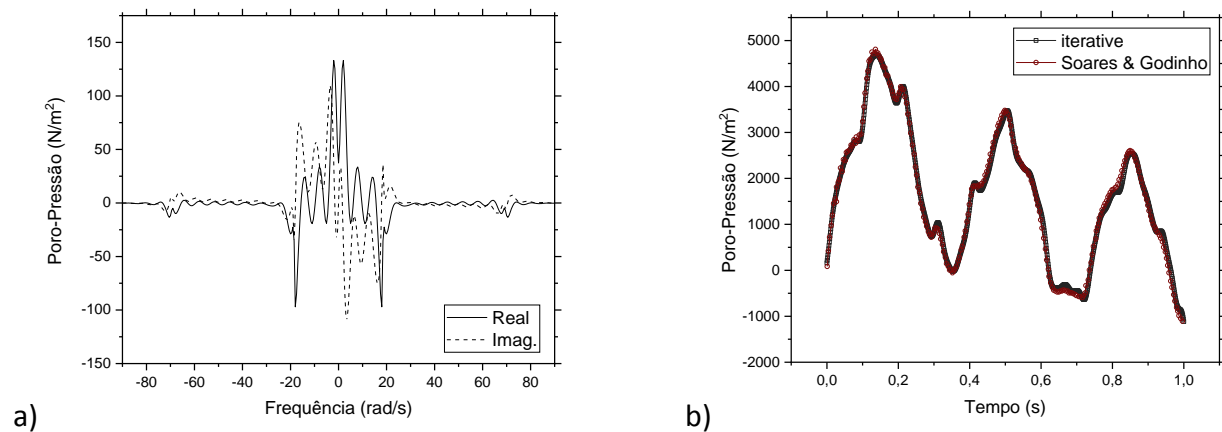


Figura 5 - Poro-Pressões do ponto B: (a) na frequência ; (b) no tempo.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE sob referência LA/P/0112/2020, no âmbito do projeto IntRail, com a referência PTDC/ECI-EGC/3352/2021. O apoio financeiro fornecido pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e pela FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) também é amplamente reconhecido.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Zienkiewicz, Taylor. The finite element method –vol. 1. oxford: butter- worth-heinemann; 2002.
 [2] Zienkiewicz, Olgierd C., et al. Computational geomechanics. chichester: wiley, 1999.
 [3] Batchelor, C. K.; Batchelor, G. K. An introduction to fluid dynamics. cambridge university press, 1967.

[4] Biot, M. A., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. low-frequency range, j. acoust. soc. am. 28 (1956) 168–178.
 [5] Biot, M. A., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 2. higher frequency range, j. acoust. soc. am. 28 (1956) 179–191.
 [6] Bathe, K.J., Finite element procedures, prentice-hall, 1996
 [7] Hughes T. Jr. the finite element method—linear static and dynamic finite element analysis. mineola, new york: dover publications; 2000.
 [8] Soares D, Rodrigues G.G., Gonçalves K.A., An efficient multi-time-step implicitexplicit method to analyze solid-fluid coupled systems discretized by unconditionally stable time-domain finite element procedures. Computers & Structures, v. 88, p. 387-394, 2010.
 [9] Matuszyk, P. J.; Demkowicz, L. F., Solution of coupled poroelastic/acoustic/elastic wave propagation problems using automatic hp-adaptivity. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 281: 54-80.
 [10] Kausel, E.; Roësset, J. M. Frequency domain analysis of undamped systems. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118.4: 721-734.
 [11] Soares, D.; Godinho, L. Nonlinear analysis of interacting saturated porous and elastic media by time-domain FEM/BEM iterative coupling procedures. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2020, 117: 299-308.

Prediction of the sound absorption of porous concrete using machine learning approaches

Luís Filipe Monteiro Pereira^{1*}
Fernando José Forte Garrido Branco¹
Luís Manuel Cortesão Godinho¹
Paulo José da Venda Oliveira¹

¹Universidade de Coimbra, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra

RESUMO

O comportamento acústico de materiais porosos à base de betão é uma temática sempre relevante em engenharia, na constante tentativa de controlo do ruído, em particular em ambientes externos. As estratégias de previsão baseiam-se geralmente em modelos teóricos, usando abordagens de fluido equivalente, e requerem o conhecimento a priori de uma série de parâmetros macroscópicos. No entanto, sua determinação nem sempre é simples ou sequer exequível, o que dificulta a aplicação geral desses modelos. Neste trabalho, uma abordagem baseada em aprendizagem computacional é implementada e testada para o caso específico de betão poroso com agregados de argila expandida. Assim, é utilizado um conjunto reduzido de parâmetros de entrada, o que constitui uma vantagem significativa quando comparado com modelos como Horoshenkhov-Swift ou Johnson-Champoux-Allard, permitindo uma previsão mais simples das características de absorção sonora destes materiais.

ABSTRACT

The acoustic behaviour of porous concrete-based materials is a relevant topic in noise control engineering, in particular in outdoor environments. Prediction strategies usually rely on theoretical models, using fluid-equivalent approaches, and require the a-priori knowledge of a number of macroscopic parameters. However, their determination is not always simple or even feasible, which hinders the general application of such models. In the present work, a *machine-learning* based approach is implemented and tested for the specific case of porous concrete with expanded clay aggregates. In this scope, a reduced set of input parameters is used, which constitutes a

significant advantage when compared with models such as Horoshenkhov-Swift or Johnson-Champoux-Allard, allowing for a simpler prediction of the sound absorption characteristics of such materials.

Palavras-chave – *redes neuronais artificiais, coeficiente de absorção sonora, acústica.*

1. INTRODUÇÃO

Os materiais porosos, em consequência de possuírem, entre outras características, baixa densidade, bom comportamento térmico e acústico (e aceitável, pelo menos para algumas finalidades, comportamento mecânico), são, atualmente, utilizados numa vasta gama de aplicações. São produzidos recorrendo a materiais como argila expandida, lava, xisto, ou cinzas vulcânicas, entre outros materiais [1]. A performance superior dos materiais porosos (relativamente ao betão de densidade normal, e nos aspetos mencionados acima) deve-se precisamente à estrutura porosa e à elevada resistência ao calor dos agregados que os compõem, o que pode traduzir-se numa redução significativa do consumo energético, em edifícios onde sejam aplicados [1]. Dada a sua eficácia no controlo passivo de ruído, são muitas vezes utilizados com essa finalidade, quer em espaços interiores quer em espaços exteriores.

No entanto, e dependendo da aplicação prática pretendida, é também extremamente importante definir (ou prever) outros parâmetros. Existem diversos modelos que permitem a previsão de propriedades acústicas a partir de parâmetros macroscópicos. Um exemplo destes modelos é o desenvolvido por Attenborough [2], que descreve características acústicas de materiais fibrosos e granulares a partir de cinco parâmetros:

¹ **Autor de contacto:** lfimpereira@student.uc.pt

porosidade, resistência ao fluxo, tortuosidade, o fator de forma e de fluxo constante e o fator de forma dinâmico.

Esta contextualização serve para salientar que o conhecimento não só dos parâmetros acústicos, mas também das propriedades intrínsecas dos materiais é de particular interesse [3], revela-se fundamental na estimativa dos seus comportamentos e serve diversos propósitos, tais como o controlo de qualidade durante o seu processo de fabrico ou a previsão do comportamento in-situ. Existem, claramente, esforços no sentido de se alcançar um único método de caracterização destes materiais, ou pelo menos um set reduzido de metodologias capazes de caracterizar a grande maioria de materiais acústicos [4].

Será assim extremamente útil o desenvolvimento de metodologias *machine learning* que possam ser aplicadas na previsão de parâmetros relevantes no comportamento acústico de materiais. Refira-se que existem já diversos estudos que recorrem a técnicas de *machine learning* para, por exemplo, prever o comportamento mecânico de betão composto por agregados leves, com recurso a programação de expressão genética [5] [6] [7], metodologias de inferência Bayesiana [8], ou mesmo redes neuronais artificiais [9].

2. REDES NEURONAS ARTIFICIAIS

A aplicação de inteligência semelhante à humana em máquinas pode ser alcançada através da utilização de algoritmos de aprendizagem para, até certo ponto, mimetizar o modo de funcionamento (e de aprendizagem) do cérebro humano. O cérebro humano consegue, instantaneamente e sem dificuldade, processar uma sequência de algoritmos manuscritos.

No entanto, escrever um código para compor um programa de computador que faça exatamente o mesmo que o nosso cérebro faz já não é tão simples. Uma tarefa tão elementar para o nosso cérebro como o reconhecer formas assume uma outra dimensão quando se pretende criar uma instrução automatizada.

As redes neuronais artificiais abordam esta questão de forma diferente. Tiram partido de uma base de dados de tamanho considerável que utilizam como exemplos de treino, e desenvolvem um sistema que aprende a partir destes exemplos de treino, ou, por outras palavras, inferem regras que lhes permitem reconhecer e classificar os dígitos manuscritos da figura 1 [10].

Como algoritmo supervisionado, uma rede neuronal artificial utiliza um dado set de parâmetros de entrada e de resposta e treina um modelo que possibilita a previsão desses parâmetros de resposta na presença de novos parâmetros de entrada, permitindo a comparação dos valores previstos com os valores reais, o que permite a melhoria da precisão do modelo de previsão.

Esta metodologia pode ser utilizada para facilitar atividades humanas de importância fundamental, como por exemplo em ensaios não destrutivos em contexto de monitorização da condição de estruturas já edificadas e em utilização, na

identificação e avaliação de patologias, avaliação do risco de deslizamentos de terra e acompanhamento do ritmo de desenvolvimento de fissuras através de emissões acústicas [11]–[14], previsão de parâmetros mecânicos e físicos [15]–[17] através da redução ou substituição completa de ensaios de laboratório ou de campo, avaliação do estado de meteorização de maciços rochosos [18] ou mesmo para prever parâmetros macroscópicos de materiais granulares, como porosidade [19], tortuosidade e permeabilidade através da análise de imagens [20], [21], propagação de ultrassons [22] ou coeficiente de absorção sonora [23].

3. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram utilizados resultados da absorção sonora reais de materiais porosos (betão poroso fabricado com argila expandida), obtidos em contexto de ensaios laboratoriais. Foram preparadas 3 misturas diferentes, com granulometrias variando entre 0-2mm, 2-4mm e 3-8mm.

Os resultados destes ensaios demonstraram a existência de correlações entre alguns destes parâmetros macroscópicos, nomeadamente entre a resistência ao fluxo de ar e a densidade, e entre a tortuosidade e o quociente entre a densidade e a porosidade [27]. De seguida, e considerando estas relações, simularam-se dados de coeficientes de absorção sonora no intervalo de frequências 125Hz-2000Hz, considerando parâmetros físicos específicos (tortuosidade, porosidade aberta, resistência ao fluxo, desvio padrão da dimensão dos poros, e a espessura) e parâmetros acústicos relevantes e que influenciam a absorção sonora dos materiais (número de onda e densidade complexos e compressibilidade), repetindo o procedimento 1500 vezes, de forma a criar uma base de dados de elementos sintéticos de dimensão considerável. Foi ainda adicionado um fator de erro aleatório, nunca superior a 5%, aquando da simulação dos parâmetros tortuosidade e resistência do fluxo de ar, assim como na determinação do coeficiente de absorção.

Posteriormente, desenvolveram-se modelos de aprendizagem computacional, recorrendo a redes neuronais artificiais (RNA).

Os dados gerados na primeira fase deste estudo foram utilizados no treino destes modelos *machine learning*, e os resultados são comparados com os resultados numéricos e experimentais. O modelo de RNA é composto por 3 camadas ocultas com 5 neurónios por camada, e aplica a função de ativação tansig (função de ativação hiperbólica sigmóide) na primeira e terceira camadas, e a função logsig (função de ativação logística sigmóide) na segunda camada (ver esquema geral na figura 1). Os resultados apresentam-se de seguida.



Figura 1- Esquema da rede neuronal desenvolvida

4. RESULTADOS

Foi determinada a correlação entre os parâmetros de entrada e o coeficiente de absorção, tendo-se observado que os fatores que mais influenciam o coeficiente de absorção são: a frequência e a espessura, seguidos dos parâmetros tortuosidade, porosidade aberta e resistência ao fluxo de ar, e finalmente o parâmetro desvio padrão da dimensão dos poros.

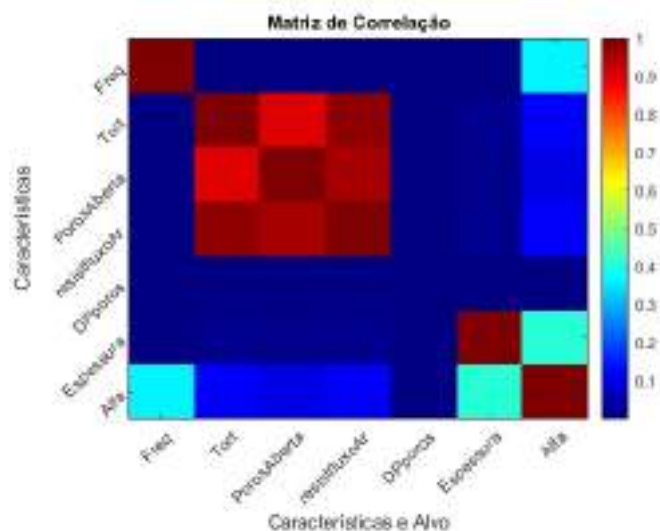


Figura 2 – Matriz de correlação entre os parâmetros de entrada e o alfa.

Face a esta correlação determinada, decidiu-se criar modelos de redes neuronais artificiais que considerassem um número variável de parâmetros de entrada (explorado na Tabela 1).

Tabela 1 – Designação do modelo RNA desenvolvido, e parâmetros considerados.

DESIGNAÇÃO DO MODELO RNA	PARÂMETROS CONSIDERADOS
Modelo 2	Frequência e Porosidade aberta
Modelo 3	Frequência, Porosidade aberta, e Espessura
Modelo 4	Frequência, Porosidade aberta, Resist. Fluxo, e Espessura
Modelo 5	Frequência, Porosidade aberta, Resist. Fluxo, Tortuos., e Espessura
Modelo 6	Todos os parâmetros (6)

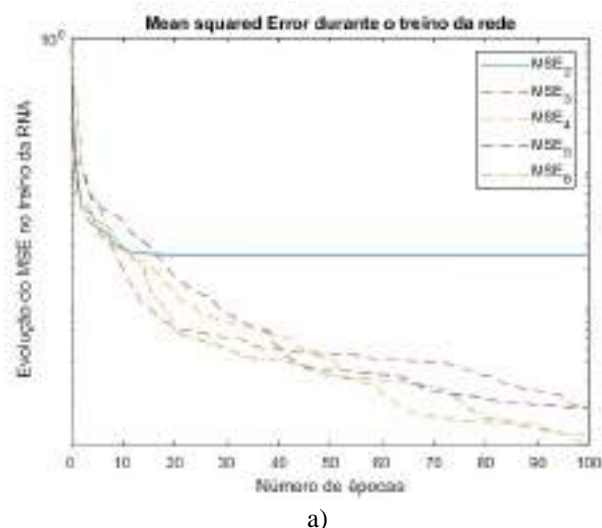
A figura seguinte (figura 3.a)) apresenta a evolução de uma métrica de avaliação do treino de uma RNA, o Mean Squared Error (MSE) ao longo das 100 épocas de treino da RNA, determinado através da seguinte expressão (Eq 1).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \hat{A}_i)^2 \quad (\text{Eq.1})$$

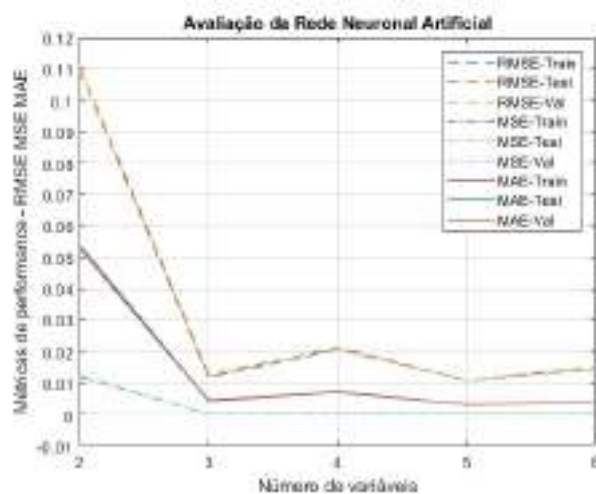
com n sendo o número total de dados, A_i os valores observados e \hat{A}_i os valores previstos pela RNA. A figura 3.b) apresenta o valor final para as métricas de avaliação RMSE, MSE e MAE obtidos pelo treino da RNA para os diferentes modelos treinados (desde 2 a 6 variáveis de entrada). Quanto mais baixos forem estes valores, mais preciso e fiável é o comportamento da rede. As métricas RMSE e MAE foram determinados pelas seguintes expressões (Eq. 2 e Eq. 3, respetivamente).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \hat{A}_i)^2} \quad (\text{Eq.2})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - \hat{A}_i| \quad (\text{Eq.3})$$



a)



b)

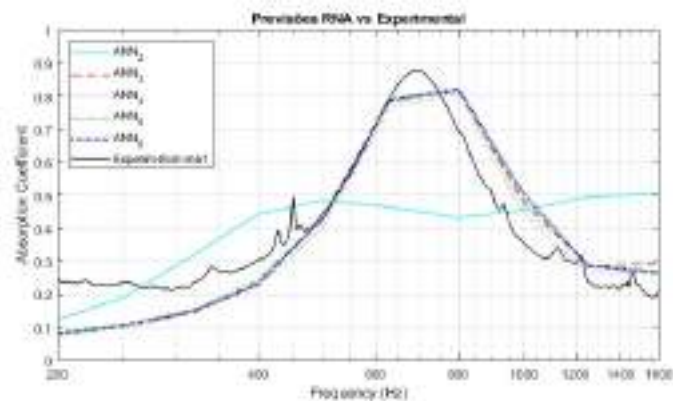
Figura 3 – Evolução do MSE ao longo do treino da RNA (a) Métricas de performance finais com diferentes número de variáveis (b).

Como se desprende da análise da figura 3.a), o modelo que considerou apenas duas variáveis não evoluiu de forma tão positiva como os restantes modelos, e isso traduz-se em previsões menos eficazes do coeficiente de absorção. O que se verifica também é que os modelos com melhor comportamento (nesta configuração, com estas configurações que influenciam os parâmetros macroscópicos), são os modelos treinados com 4 e 6 variáveis.

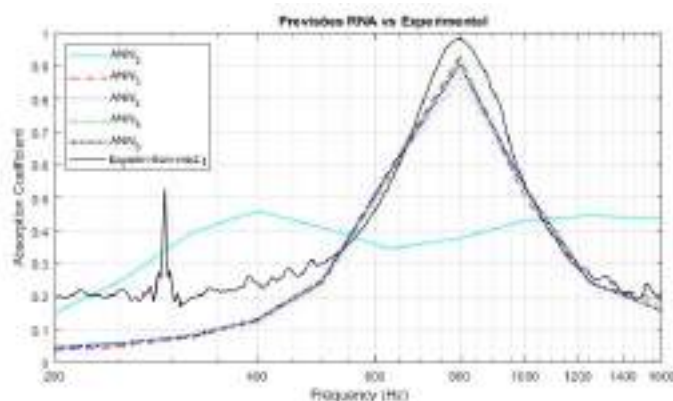
A figura 3.b) mostra que o modelo que considera apenas 2 variáveis não é satisfatório, apresentando os valores mais elevados de todas as métricas de avaliação. O que também se

pode concluir é que não existe grande melhoria destas métricas a partir do modelo que considera 3 variáveis (frequência, espessura e porosidade aberta), verificando-se uma tendência para uma horizontalização das curvas.

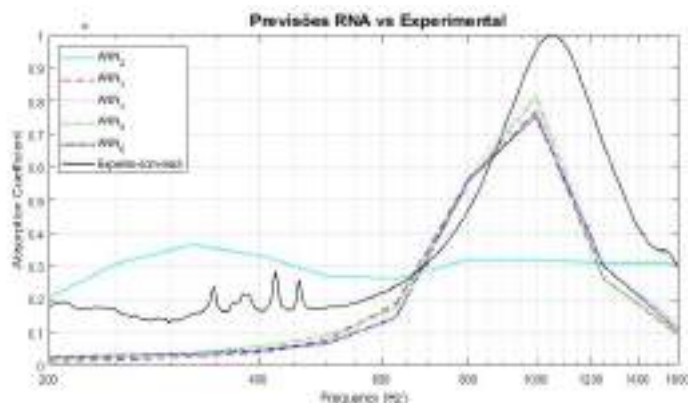
A figura 4 mostra a comparação entre as curvas do coeficiente de absorção previstas pelos diferentes modelos RNA desenvolvidos e a curva obtida através de ensaio laboratorial (curva a negro cheio), para 3 misturas diferentes. Salienta-se que o treino das RNA para cada mistura considerou as relações específicas entre os parâmetros de entrada, mencionados anteriormente.



a)



b)



c)

Figura 4 – Comparação entre as curvas previstas pelos modelos RNA e as curvas experimentais, para o parâmetro coeficiente de absorção, e para diferentes misturas (mistura 1 (fig. 4.a)) – mistura 2, (fig. 4.b)) – mistura 3 (fig. 4.c)).

Pode-se retirar da análise da figura anterior que os modelos de RNA desenvolvidos acompanham de modo muito evidente a curva obtida em laboratório, com a exceção óbvia do modelo que considerou apenas dois parâmetros, que se revelou claramente incapaz de prever o comportamento real das amostras ensaiadas.

Naturalmente, o modelo 6 revelou um comportamento bastante preciso e similar à curva experimental, no entanto, o modelo 3 já conseguiu previsões interessantes, conseguindo, a par do modelo 4, uma resposta praticamente idêntica (tendo até superado a previsão do modelo 6 no caso da mistura 3 com 4 centímetros de espessura.

5. CONCLUSÕES

A tentativa de previsão do comportamento acústico de materiais porosos à base de betão assume relevância considerável em engenharia baseia-se geralmente em modelos teóricos, usando abordagens de fluido equivalente, e exigem o conhecimento prévio de diversos parâmetros macroscópicos. Este trabalho demonstrou a adequabilidade da aplicação de metodologias *machine learning* na previsão do coeficiente de absorção sonora destes materiais, demonstrando que a utilização de um número reduzido de parâmetros macroscópicos no treino de modelos de RNA alcança resultados muito satisfatórios na previsão do coeficiente de absorção sonora de betões porosos. As métricas de avaliação MAE, MSE e RMSE demonstraram a convergência dos modelos desenvolvidos (com a exceção do modelo 2), e a comparação das curvas obtidas pelos modelos RNA e a curva obtida experimentalmente demonstrou a adequabilidade desta abordagem.

Adicionalmente, foi possível aferir que os modelos 3 e 4 alcançaram previsões muito próximas do modelo 6 (que considerava todos parâmetros), o que, aliado à tendência para a estagnação dos valores das métricas RMSE a partir do modelo 3 (observáveis na figura 3.b)), pode levar a concluir que serão modelos mais limpos e isentos de eventual ruído que a inclusão do parâmetro tortuosidade dos poros introduz no treino nos modelos 5 e 6.

FINANCIAMENTO:

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE sob referência LA/P/0112/2020.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ao abrigo do acordo de subvenção 2022.12096.BD atribuído ao 1º autor.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Tanhadoust *et al.*, “Predicting stress-strain behavior of normal weight and lightweight aggregate concrete exposed to high temperature using LSTM recurrent neural network,” *Constr Build Mater*, vol. 362, p. 129703, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129703.
- [2] K. Attenborough, “Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, no. 3, pp. 785–799, 1983, doi: 10.1121/1.389045.
- [3] M. R. Stinson and Y. Champoux, “Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, no. 2, pp. 685–695, 1992, doi: 10.1121/1.402530.
- [4] L. Jaouen, A. Renault, and M. Deverge, “Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: Available experimental methods and applications to a melamine foam,” *Applied Acoustics*, vol. 69, no. 12, pp. 1129–1140, 2008, doi: 10.1016/j.apacoust.2007.11.008.
- [5] S. Jafari and S. S. Mahini, “Lightweight concrete design using gene expression programming,” *Constr Build Mater*, vol. 139, pp. 93–100, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.120.
- [6] V. N. Pham, E. Oh, and D. E. L. Ong, “Effects of binder types and other significant variables on the unconfined compressive strength of chemical-stabilized clayey soil using gene-expression programming,” *Neural Comput Appl*, vol. 34, no. 11, pp. 9103–9121, 2022, doi: 10.1007/s00521-022-06931-0.
- [7] H. Y. Leong, D. E. L. Ong, J. G. Sanjayan, and A. Nazari, “A genetic programming predictive model for parametric study of factors affecting strength of geopolymers,” *RSC Adv*, vol. 5, no. 104, pp. 85630–85639, 2015, doi: 10.1039/c5ra16286f.
- [8] S. C. Jong, D. E. L. Ong, and E. Oh, “A novel Bayesian inference method for predicting optimum strength gain in sustainable geomaterials for greener construction,” *Constr Build Mater*, vol. 344, no. June, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128255.
- [9] L. Pereira, L. Godinho, and F. G. Branco, “Predicting unconfined compression strength and split tensile strength of soil-cement via artificial neural networks,” *Geomechanics and Engineering*, vol. 33, no. 6, pp. 611–624, 2023, doi: 10.12989/gae.2023.33.6.611.
- [10] H. Wang, R. Czerminski, and A. C. Jamieson, *Neural Networks and Deep Learning*, vol. 25. Determination press San Francisco, CA, USA, 2021. doi: 10.1108/978-1-83909-694-520211010.
- [11] W. Mao, L. Hei, and Y. Yang, “Advances on the acoustic emission testing for monitoring of granular soils,”

- Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 185, p. 110110, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110110.
- [12] H. Lo Lee, J. S. Kim, C. H. Hong, and D. K. Cho, "Ensemble learning approach for the prediction of quantitative rock damage using various acoustic emission parameters," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, p. 4008, 2021, doi: 10.3390/app11094008.
- [13] L. Deng, A. Smith, N. Dixon, and H. Yuan, "Machine learning prediction of landslide deformation behaviour using acoustic emission and rainfall measurements," *Engineering Geology*, vol. 293, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106315.
- [14] L. Deng, A. Smith, N. Dixon, and H. Yuan, "Machine learning prediction of landslide deformation behaviour using acoustic emission and rainfall measurements," *Engineering Geology*, vol. 293, no. 8, pp. 2959–2974, 2021, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106315.
- [15] X. Shi, Q. Liu, and L. Xiujuan, "Application of SVM in predicting the strength of cement stabilized soil," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 160, pp. 313–317, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.160.313.
- [16] S. Suman, M. Mahamaya, and S. K. Das, "Prediction of Maximum Dry Density and Unconfined Compressive Strength of Cement Stabilised Soil Using Artificial Intelligence Techniques," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1007/s40891-016-0051-9.
- [17] P. Narloch, A. Hassanat, A. S. Tarawneh, H. Anysz, J. Kotowski, and K. Almohammadi, "Predicting compressive strength of cement-stabilized rammed earth based on SEM images using computer vision and deep learning," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 23, p. 5131, 2019, doi: 10.3390/app9235131.
- [18] M. E. Hatir, M. Barstuğan, and İ. İnce, "Deep learning-based weathering type recognition in historical stone monuments," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 45, pp. 193–203, 2020, doi: 10.1016/j.culher.2020.04.008.
- [19] Y. Liu, M. Li, P. Su, B. Ma, and Z. You, "Porosity prediction of granular materials through discrete element method and back propagation Neural Network algorithm," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 5, p. 1693, 2020, doi: 10.3390/app10051693.
- [20] K. M. Graczyk and M. Matyka, "Predicting porosity, permeability, and tortuosity of porous media from images by deep learning," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-78415-x.
- [21] B. Boukhatem, R. Rebouh, A. Zidol, M. Chekired, and A. Tagnit-Hamou, "An intelligent hybrid system for predicting the tortuosity of the pore system of fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 205, pp. 274–284, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.005.
- [22] T. Lähivaara, L. Kärkkäinen, J. M. J. Huttunen, and J. S. Hesthaven, "Deep convolutional neural networks for estimating porous material parameters with ultrasound tomography," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 143, no. 2, pp. 1148–1158, 2018, doi: 10.1121/1.5024341.
- [23] J. H. Jeon, S. S. Yang, and Y. J. Kang, "Estimation of sound absorption coefficient of layered fibrous material using artificial neural networks," *Applied Acoustics*, vol. 169, p. 107476, 2020, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107476.
- [24] V. Kecman, *Support Vector Machines – An Introduction* BT - *Support Vector Machines: Theory and Applications*, vol. 47. Springer Science & Business Media, 2005.
- [25] N. Deng, Y. Tian, and C. Zhang, "Support vector machines: Optimization based theory, algorithms, and extensions," *Support Vector Machines: Optimization Based Theory, Algorithms, and Extensions*, pp. 1–315, 2012, doi: 10.1201/b14297.
- [26] S. Shalev-Shwartz and S. Ben-David, *Understanding machine learning: From theory to algorithms*, vol. 9781107057. Cambridge university press, 2013. doi: 10.1017/CBO9781107298019.
- [27] Pereira, M., Carbajo, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P., Mateus, D., & Ramis, J. (2019). Acoustic behavior of porous concrete. Characterization by experimental and inversion methods. *Materiales de construcción*, 69(336), e202-e202.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

NOR-0 Normativa y legislación acústica.



CRITERIOS DE INTELIGIBILIDAD EN LOS SISTEMAS DE ALARMA Y EVACUACIÓN POR VOZ

Juan Manuel Díaz Contreras^{1*}
Pablo Vaquera Bermúdez²

¹ Director de Proyectos en LDA AUDIOTECH, S.L., I. T. Telecomunicación (esp Sonido e Imagen).

² Responsable del área de Consultoría en LDA AUDIOTECH S.L.

RESUMEN

El índice de inteligibilidad (STI, del inglés Speech Transmission Index) en los sistemas de alarma y evacuación por voz, permite valorar el grado de percepción y entendimiento del mensaje, debiendo ser mayor o igual a 0,5 en el 95% del área en estudio, según la norma de aplicación actual UNE EN 60849. En esta comunicación se analiza cómo mejorar los niveles de STI a partir del tratamiento digital de la señal proveniente de la fuente sonora, adaptando las bandas de frecuencias que mejoran el rendimiento del algoritmo de medición, así como las referencias a la futura normativa de aplicación UNE EN 23007-32 sobre “Sistemas de detección y alarma de incendios - Parte 32: Planificación, diseño, instalación, puesta en marcha, uso y mantenimiento de sistemas de alarma por voz”, que ya ha sido publicada en el RSCIEI y que será incluida próximamente en el RIPCI, reemplazando a las actuales UNE EN 23007-14 y UNE EN 60849. Se revisarán también los límites físicos que establece la norma UNE-EN 60268-16 sobre “Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla” aplicados a diferentes entornos reverberantes para la implantación de sistemas de alarma y evacuación por voz.

ABSTRACT

The Speech Transmission Index (STI) in voice alarm and evacuation systems allows evaluating the degree of perception and understanding of the message, which should be greater than or equal to 0.5 in 95% of the area under study, according to the current UNE EN 60849 standard. This communication analyzes how to improve STI levels through digital processing of the signal from the sound source, adapting frequency bands that enhance the measurement algorithm's performance, as well as references to the upcoming UNE EN 23007-32 application standard on 'Fire detection and alarm systems - Part 32: Planning, design, installation, commissioning, use, and maintenance of voice

alarm systems,' which has already been published in the RSCIEI and will soon be included in the RIPCI, replacing the current UNE EN 23007-14 and UNE EN 60849. The physical limits established by the UNE-EN 60268-16 standard on 'Objective assessment of speech intelligibility by speech transmission index' applied to different reverberant environments for the implementation of voice alarm and evacuation systems will also be reviewed.

Palabras Clave— inteligibilidad, evacuación, megafonía.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de alarma y evacuación por voz (PAVA, del inglés Public Address and Voice Alarm) es un sistema de comunicación diseñado para proporcionar instrucciones claras y precisas en situaciones de emergencia, o cualquier otra situación en la que sea necesario comunicarse con un gran número de personas de manera rápida y efectiva.

Los criterios de diseño de los sistemas PAVA están sujetos a requisitos normativos, entre otros, la inteligibilidad o el porcentaje de palabras entendidas correctamente, del total de pronunciadas por un orador perfecto.

Para medir la inteligibilidad en un recinto para casos de evacuación, los métodos aceptados son el índice de transmisión del habla STI (Speech Transmission Index), y el índice de transmisión del habla en megafonía STIPA (Speech Transmission Index for Public Address) [1] que es una simplificación del anterior. En ambos casos se emplea una señal de prueba que inyecta en el sistema una señal modulada que imita el habla con sus típicas fluctuaciones de intensidad. Este fenómeno se puede analizar mediante la función de transferencia de modulación (MTF, del inglés Modulation Transfer Function) [2], que cuantifica la pérdida de modulación de la voz.

* **Autor de contacto:** juanmadiazcontreras@gmail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

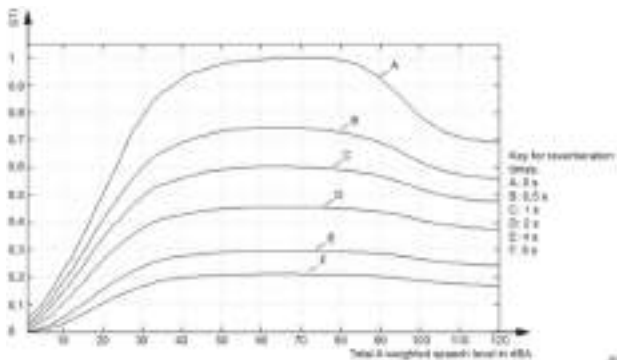


Figura 1. Relación entre STI y nivel del habla para diferentes RT.

La distorsión introducida por el ruido, el sistema de evacuación, los altavoces y la reverberación del recinto se traduce en cambios de la señal de prueba que quedan reflejados en la medición del índice STI, según Ec. 1:

$$STI = \sum_{i=1}^7 W_i (S/N_i + 15)/30 \quad (1)$$

Donde STI = índice de transmisión del habla
 W_i = ponderación asociada a la banda de octava i
 S/N_i = relación equivalente de habla-ruido para la banda de octava i
 i = índice que identifica a las 7 bandas de octava entre 125 y 8000Hz

Métodos como el RASTI (del inglés, Rapid STI) [2] o el STITEL no se determinan adecuados para medir la inteligibilidad de un sistema de evacuación por voz [3].

2. LÍMITES OBJETIVOS DE LA INTELIGIBILIDAD

Los factores que determinan la inteligibilidad están relacionados de manera directa entre sí, de manera que el tiempo de reverberación (RT, del inglés Reverberation Time) del recinto condicionará el nivel de STI; una reverberación excesiva hará que el sonido dificulte la comprensión del habla [4]. Del mismo modo, un nivel excesivo de ruido de fondo también interfiere en la capacidad de entendimiento del mensaje; la mejora de la relación señal-ruido ayudará a mejorar la inteligibilidad [5]. Por tanto, en el diseño del sistema PAVA el nivel de presión sonora (SPL, del inglés Sound Pressure Level) deberá ser el adecuado para obtener el grado de inteligibilidad deseado según el tipo de recinto.

Esta relación física entre el tiempo de reverberación, nivel de presión sonora e inteligibilidad, se refleja en la Figura 1, y determina el condicionamiento mutuo entre dichos factores en el mensaje emitido.

En función del uso del recinto, se determinan unos valores objetivos de STI. Así, en la evacuación por voz (VA

systems) se recomienda un valor objetivo de 0,5, un valor mínimo de 0,46 para recintos complejos, y nunca inferior a 0,42, como se muestra en la Figura 2 [1].

Category	Nominal STI value	Type of message information	Examples of typical uses (for natural or reproduced voice)	Comment
A+	>0,76		Recording studios	Excellent intelligibility but rarely achievable in most environments
A	0,74	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, parliaments, courts, Assistive Hearing Systems (AHS)	High speech intelligibility
B	0,7	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts	High speech intelligibility
C	0,66	Complex messages, unfamiliar words	Lecture theatres, classrooms, concert halls	Good speech intelligibility
D	0,62	Complex messages, familiar words	Concert halls, modern churches	High quality PA systems
E	0,58	Complex messages, familiar context	PA systems in shopping malls, public buildings offices, VA systems, cathedrals	Good quality PA systems
F	0,54	Complex messages, familiar context	Shopping malls, public buildings offices, VA systems	Target value for VA systems
G	0,5	Simple messages, familiar words	VA and PA systems in difficult acoustic environments	Normal lower limit for VA systems
H	0,46	Simple messages, familiar context	VA and PA systems in very difficult spaces	
I	0,42		Not suitable for PA systems	
J	0,38		Not suitable for PA systems	
U	<0,36		Not suitable for PA systems	

NOTE 1 These values should be regarded as minimum target values.
 NOTE 2 Perceived intelligibility relating to each category will also depend on the frequency response at each listening position.
 NOTE 3 The STI values refer to measured values in sample listening positions or as required by specific application standards.

Figura 2. Evaluación objetiva del STI en función del recinto.

3. CRITERIOS NORMATIVOS

En España, la implantación de un sistema PAVA es de obligado cumplimiento, según indica el Código Técnico de la Edificación (CTE) en el Documento Básico de Seguridad en caso de incendio (DB-SI), para aquellos recintos de pública concurrencia con un aforo mayor de 500 personas o una superficie mayor de 500 m² y uso hospitalario en todos los casos. Para entornos industriales, actualmente está recomendado en superficies superiores a 10.000 m², estando prevista su obligatoriedad a futuro para superficies superiores a 10.000 m² y densidad de ocupación mayor a 3 personas por cada 100 m² [6].

Para el diseño de sistemas PAVA el reglamento anterior hace referencia actualmente a las normas UNE 23007-14 y la UNE EN 60849, que especifican los requisitos y las directrices para los sistemas utilizados en edificios y áreas públicas con el propósito de transmitir mensajes de alarma y evacuación en situaciones de emergencia, como incendios u otras situaciones de peligro.

Los criterios de diseño que determina la legislación actual son:

- Un nivel sonoro mínimo de 65 dBA, o 5 dBA por encima del ruido de fondo equivalente en 30s, y nunca superior a 120dBA. En el caso de personas que estén durmiendo, el nivel sonoro mínimo en cabecera será de 75 dBA.
- Un nivel de STI mayor o igual a 0,5.

Los reglamentos de protección contra incendios (RIPCI para instalaciones y RSCIEI para entornos industriales)

tienen previsto referenciar en su próxima revisión la norma UNE EN 23007-32 para el futuro diseño de sistemas PAVA [7]. Esta norma es parte de la serie más reciente de normas europeas EN 54 relacionadas con sistemas de alarma y evacuación por voz. En esta nueva norma, indica criterios de diseño para sistemas de alarma y evacuación por voz:

- Un nivel de sonoro de, al menos, 10 dB por encima del nivel de ruido ambiente.
- Un nivel de inteligibilidad del habla media en el 90% de cada área acústica que se defina no inferior a 0,5 STI, siendo el mínimo absoluto permitido 0,45 STI.

Esta nueva norma UNE EN 23007-32 se centra exclusivamente en sistemas de alarma por voz utilizados en situaciones de evacuación de emergencia. Está diseñada específicamente para sistemas de sonido que utilizan voz humana o sintetizada para transmitir mensajes de alarma y evacuación, estableciendo requisitos detallados relacionados con la calidad del sonido, la inteligibilidad, la distribución de altavoces, la resistencia al fuego y otros aspectos técnicos específicos para estos sistemas.

3.1. Nuevos métodos para el cálculo de la inteligibilidad: prescriptivo y detallado

La nueva norma propone dos métodos para diseñar el VAS (del inglés, Voice Alarm System), siendo el prescriptivo y el detallado [8], en función del tipo de recinto.

El método prescriptivo permite que los resultados puedan ser anticipados o alcanzados, siempre que el área acústicamente diferenciable (ADA) en estudio sea simple, de tal manera que:

- El tiempo de reverberación no sea mayor a 1'3 segundos en 500Hz, 1kHz, 2kHz;
- El nivel de ruido ambiente sea menor que 65dBA.
- El nivel de presión sonora de los tonos de alerta y mensaje será mayor que 75 dB L_{AeqT} (siendo T la duración del mensaje).
- Altura de instalación de altavoces inferior a 5 m.
- Distancia entre altavoces adyacentes inferior a 6 m (y de 12 m para altavoces bidireccionales).
- Distancia no obstruida entre altavoz y oyente no mayor a 4,5 m para altavoces unidireccionales, y de 6 m para altavoces bidireccionales.

De este modo, la norma predice asegurar el cumplimiento de la inteligibilidad para ADAs con dichas características.

Por otro lado, el método detallado se deberá usar en todas las ADAs donde las recomendaciones para el método prescriptivo no se puedan medir o predecir. Los diseños deberán ser realizados por personal adecuadamente cualificado y deberán seguir los requisitos para el uso del STI como una herramienta predictiva de diseño.

Área del ADA (m ²)	Número mínimo de puntos de medición
Menos de 25	1
25 a menos de 100	3
100 a menos de 500	6
500 a menos de 1500	10
1500 a menos de 2500	15
Mayor de 2500	15 por cada 2500 m ²

Figura 3. Número mínimo de puntos de medición.

La norma establece dos tipos de métodos detallados posibles:

- Cálculos basados en parámetros predichos estadísticamente, predicción del STI mediante la matriz de función de transferencia de modulación completa (MTF), según UNE-EN 60268-16.
- Modelo de simulación por ordenador basadas en respuestas al impulso simuladas, mediante modelo tridimensional y ajustado al tiempo de reverberación previsto o medido, según UNE-EN 60268-16.

Estas herramientas para el modelo de simulación, que fundamentan su simulación en la teoría de rayo sonoro [2], deben considerar:

- Una respuesta al impulso simulada de 1,6 s mínimo de duración.
- El umbral de audición absoluto, los efectos de enmascaramiento auditivo y el espectro de ruido ambiente previsto.
- El espectro de frecuencias de la voz para el cálculo de la relación señal a ruido, incluyendo cualquier equalización específica para el proyecto.

3.2. Verificación del nivel de inteligibilidad en campo

Para el procedimiento de medición y cálculo del índice STI se debe tomar la medida de inteligibilidad del habla dentro de cada ADA en varios puntos de medición [8], en función de la superficie, según lo indicado en la Figura 3.

Para la medición de la inteligibilidad, podrán ser utilizados los métodos directos e indirectos [1], siendo los primeros aquellos que utilizan una señal test modulada (utilizados en la práctica para medir la inteligibilidad de los sistemas PAVA), y los segundos basados en la respuesta al impulso del sistema (solo aplicables a sistemas lineales invariantes en tiempo).

Se deberán tener en cuenta las correcciones según si los tiempos de reverberación, ruido ambiente, y los niveles de habla de emergencia existentes son diferentes en la medición respecto a los usados para el diseño [1].

Aun así, existen situaciones con entornos excesivamente reverberantes y ruidosos donde los niveles marcados no se pueden lograr y la norma los tiene en cuenta. En esos casos se deberá acordar un nivel de inteligibilidad por el comprador y la AC (Autoridad Competente) [8]. El comprador, en consulta con la AC, deberá definir y documentar claramente las responsabilidades y por parte de quién serán asumidas dentro del proyecto general.

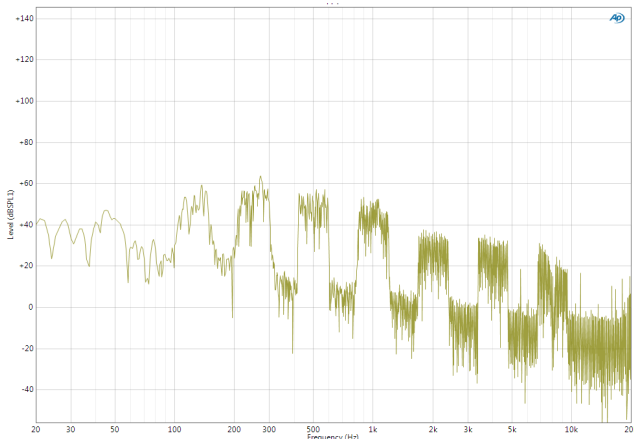


Figura 4. Espectro de la señal STIPA.

4. ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE PRUEBA STIPA

Para poder optimizar el nivel de inteligibilidad en un recinto, conviene conocer la estructura de la señal utilizada para la verificación en campo.

La norma UNE-EN 60268-16 menciona los métodos Full STI, que mide las 98 combinaciones de modulación y frecuencia, y el método STIPA, que presenta solo 14 combinaciones, permitiendo de este modo realizar la medición de inteligibilidad mediante equipos portátiles. El uso del método STIPA es una simplificación del método Full STI que permite evaluar el STI de manera rápida y fiable.

Ambos métodos utilizan una señal basada en ruido rosa adaptada al nivel de la voz humana, modulado de forma sinusoidal con 14 frecuencias distintas en 7 octavas de frecuencia diferentes. Estas modulaciones imitan las fluctuaciones de la intensidad de la voz existentes al emitir un mensaje. El resultado se expresa en una escala de 0 a 1, donde 0 representa una inteligibilidad pobre y 1 una inteligibilidad perfecta.

La señal STIPA, que se define como una señal de habla sintética para evaluar la inteligibilidad, presenta el espectro representado en la Figura 4.

Esta información nos permite analizar el porcentaje de contribución de cada una de las bandas de tercio de octava al nivel STI definitivo [4].

Según aprecia en la Figura 5, esta contribución otorga un mayor peso a la banda de octava de 2 kHz, junto con las bandas de 1 kHz y 4 kHz. Esto nos permitirá planificar ajustes para mejorar la respuesta en frecuencia del sistema.

5. AJUSTES DEL SISTEMA RESPECTO DE LA SEÑAL STIPA Y MEJORA DEL STI

A nivel de arquitectura de sistema VAS, la mejora del nivel de inteligibilidad se puede llevar cabo aplicando diversas medidas predictivas y correctivas, se citan varias a continuación:

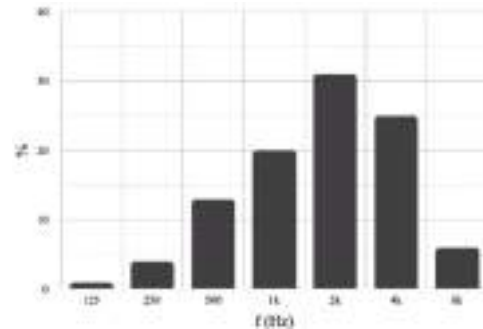


Figura 5. Porcentaje de contribución a STI por banda de octava

- Adecuada respuesta en frecuencia de los transductores y bajo nivel de distorsión.
- Adecuada cobertura con una óptima distribución y angulación, evitando cancelaciones y retardos entre transductores
- Implantar sistemas de control automático de ganancia para mejorar la relación señal-ruido.
- Ajustar la respuesta en frecuencia de salida del sistema al espectro de la señal STIPA.

Nos centraremos en esta última, que propone una ecualización paramétrica por bandas a la salida de la amplificación, con el objetivo de realzar las frecuencias clave del espectro del habla, según la acústica del recinto.

De forma genérica, la mejora de un sistema de ecualización para el refuerzo de sonido del habla elimina las frecuencias inferiores a 125Hz, se mantiene plana en el rango de 125Hz a 2kHz, dado que la mayor parte de la inteligibilidad del habla humana se centra en el rango de 1 a 2 kHz, según se puede ver en la Figura 6. Aumentar las frecuencias por encima de este rango aumentará la sibilancia, pero no necesariamente mejorará la inteligibilidad [9].

Por tanto, conociendo la influencia de las bandas de contribución de la señal al STI y el espectro STIPA, se deberá determinar la mejor respuesta en frecuencia mediante el procesamiento digital de la señal, centrado en la banda de 1 y 2 kHz de tercio de octava.

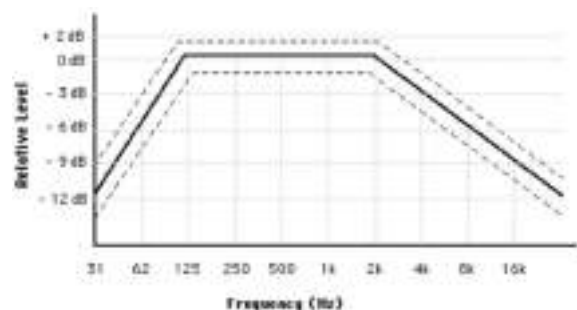


Figura 6. Curva de ecualización para la mejora del habla.

6. CASO REAL

Se estudia la renovación del sistema de una emblemática estación metropolitana, tras su reciente reforma integral. En este caso, se analizará el vestíbulo principal (hall).

6.1. Análisis previo de la problemática presentada

Al tratarse de un recinto en construcción, no es posible tomar mediciones previas, por lo que el RT se deberá estimar en base a las características arquitectónicas del recinto y las propiedades absorbentes de los materiales.

La Propiedad, por motivos estéticos, solo permite la instalación de un tipo determinado de transductores en ubicaciones concretas.

6.2. Estudio de simulación acústica

Por el tipo de recinto y sus características, se refiere al método detallado, modelando en 3D el área en estudio, ubicando las diferentes áreas de audiencia a 1,6 m y estableciendo el posicionamiento requerido de los transductores en la herramienta de predicción acústica.

El RT es determinado por la herramienta en base a la arquitectura modelada y la absorción de los materiales constructivos, obteniendo resultados de 2,26 s en la banda de 500 Hz, 2,24 en 1 kHz y 2,63 en 2 kHz.

El nivel de ruido es estimado en base a la experiencia en recintos similares, estableciéndose en 80 dB.

Para el cálculo del STI, teniendo en cuenta el enmascaramiento de señal y el ruido de fondo, se obtiene el espectrograma de la Figura 7, resultando un valor de 0.39 en el área en estudio.

Se considera que los resultados se ajustan a lo esperado considerando los tiempos de reverberación y el enmascaramiento de señal, además de las limitaciones establecidas en cuanto a las posibilidades de instalación.

6.3. Mediciones de STIPA en campo

Para la verificación de los resultados en campo, se estiman 3 puntos de medición al ser una superficie 95,66 m².

Se descartará las superficies menores a 10 m², así como el 10% de peores registros de STI, realizando la media aritmética del resto de resultados para cada ADA [8].

Para el ruido de fondo, se registra un valor de 75,4 dB.

La Tabla 1 muestra los valores tomados en los tres puntos del ADA en estudio:

Tabla 1. STI y SNR obtenido en campo.

ADA	STI	L _{Aeq10} [dBA]	SNR [dB]
Hall 01	0,45	88,0	12,6
Hall 02	0,44	87,1	11,7
Hall 03	0,45	84,9	9,5



Figura 7. Valores de STI + N(Mask) broadband.

Se hace necesario, por tanto, aplicar medidas correctivas para poder mejorar los resultados.

6.4. Medidas correctivas aplicadas

Para mejorar los niveles de STI y SNR, se lleva a cabo:

- El refuerzo del campo sonoro directo, aumentando la densidad de altavoces, y realizando ajustes en la orientación para mejorar la cobertura
- La implementación de un sistema de CAG, para el ajuste a tiempo real del SNR, mitigando el efecto del enmascaramiento.
- El procesamiento digital de la señal de salida, para la mejora de la inteligibilidad de palabra, realizando la ecualización paramétrica de bandas mostrada en la Tabla 2.

Tabla 2. Ecualización paramétrica para la mejora del STI.

Frecuencia [Hz]	Q	Ganancia [dB]
60	0,3	- 10
2.000	0,3	+ 6
5.000	0,3	+ 6
8.000	0,3	+3

6.5 Verificación final

Tras las medidas correctivas aplicadas, se retoman las mediciones en campo, consiguiendo una mejora de la inteligibilidad para obtener los valores de la Tabla 3, siendo una media de 0,46 para el STI y una SNR por encima de los 10 dB, para el ADA en estudio.

Tabla 3. STI y SNR obtenido tras las medidas correctivas.

ADA	STI	L _{Aeq10} [dBA]	SNR [dB]
Hall 01	0,47	88,1	12,7
Hall 02	0,45	88,0	12,6
Hall 03	0,46	85,9	10,5

Se concluye, por tanto, que las medidas correctivas adoptadas son satisfactorias.

7. CONCLUSIONES

La inteligibilidad y el nivel sonoro son los principales parámetros de diseño en los sistemas de alarma por voz para asegurar la correcta transmisión del mensaje.

Existe una dependencia física de factores determinantes en un sistema VAS, como son el RT y el ruido de fondo, que no depende del tipo de sistema propuesto.

Un entorno acústicamente favorable es fundamental y causa principal para asegurar el nivel deseado de STI, siendo esencial mantener una excelente cobertura y un adecuado ajuste del sistema en las bandas de influencia de la voz y el espectro de señal STIPA.

La nueva norma simplifica la fase de diseño para entornos simples, lo que permite agilizar la implantación de los sistemas de alarma por voz; del mismo modo, establece directrices para recintos complejos que únicamente serán diseñados por personal adecuadamente cualificado. Esta cualificación es clave para establecer qué profesionales pueden llevarlo a cabo, que deberá fijar la Administración.

La nueva norma establece también la figura de Autoridad Competente como aquel organismo autorizado para regular y acreditar el cumplimiento de los requisitos de diseño. Este punto también es clave para asegurar el correcto diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas VAS.

Para entornos en los que el elevado nivel de RT dificulta poder llegar a valores de STI adecuados, la nueva norma permite establecer excepciones mediante acuerdos firmados con la AC, lo que facilita implantar sistemas VAS en recintos que, si bien no permiten llegar al nivel de STI o SNR adecuados, permitirá un refuerzo adicional certificado a los sistemas de evacuación convencionales (sirenas o avisos luminosos), mejorando el nivel de seguridad en caso de evacuación. En definitiva, salvando vidas.

8. REFERENCIAS

- [1] CENELC. BS EN 60268-16:2011. "Sound system equipment. Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index". Bruselas. Agosto 2011.
- [2] C. M. Harris, "Manual de medidas acústicas y control de ruido", McGraw-Hill, ISBN: 84-481-1619-4. Madrid. 1991.
- [3] J. Barrera, J. M. Díaz, "La inteligibilidad en los sistemas de evacuación por voz", Málaga, 2020. Link: <https://lda-audiotech.com/category/articulos/blog-tecnico/>
- [4] F. Alton Everest, Master Handbook of acoustics, McGraw-Hill, 1981.
- [5] J. Ramis Soriano, A. Uris Martínez, J. Alba Fernández y J. A. Martínez Mora, "Curso Experimental de acústica de salas", Universidad Politécnica de Valencia, p. 145-159. SUPPV-98.373. Gandía. 1998.

[6] J. Barrera, "¿Cuándo es obligatorio un sistema de evacuación por voz en España?", Málaga. 2018. Link: <https://lda-audiotech.com/category/articulos/blog-tecnico/>

[7] Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, "Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales" (Borrador 15 de septiembre 2022).

[8] AENOR. UNE 23007-32. "Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 32: Planificación, diseño, instalación, puesta en marcha, uso y mantenimiento de sistemas de alarma por voz", Madrid. Septiembre 2020.

[9] Shure, "Equalization and speech intelligibility". 2020. Link: <https://service.shure.com/s/article/equalization-and-speech-intelligibility>

[10] NTi Audio, "How do we measure Speech Intelligibility STI?". Link: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/how-do-we-measure-speech-intelligibility-sti>

[11] AENOR. UNE EN 23007-14, "Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 14: planificación, diseño, instalación, puesta en servicio, uso y mantenimiento". Madrid. Diciembre 2009.

[12] AENOR. UNE-EN 60849, "Sistemas electroacústicos para servicios de emergencia". Madrid. Mayo 2002.

[13] P. Goli, M. Reza Karami-mollaei, "Speech intelligibility improvement in noisy environments based on energy correlation in frequency bands", Digital Signal Processing, Volume 62. 2017. Pages 238-248.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

NOR-1 Revisión RD1367.



ISO 1996 Y RD 1367/2007: UNA CONFLUENCIA NECESARIA.

Antonio Pedrero González^{1*}

¹Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

La familia de normas ISO 1996 constituye el marco de referencia en cuanto a la evaluación del ruido ambiental. Nacida como Recomendación ISO en 1971, en sus sucesivas ediciones ha ido incorporando los avances en el conocimiento sobre la medición y la posterior evaluación del ruido ambiental, y sus criterios son reconocidos y aceptados por la comunidad científica internacional.

Por otra parte, los procedimientos de medida especificados en el RD 1367/2007 se basan, fundamentalmente, en la experiencia previa en mediciones de ruido ambiental aportada por diversas instituciones, tanto de la administración pública como del sector privado, que colaboraron en su redacción. Estos criterios coinciden en algunos casos con los especificados en las últimas ediciones de las normas ISO 1996, pero en otros casos difieren significativamente.

En esta comunicación se analizan y se comparan ambas reglamentaciones, y se identifican los aspectos del RD 1367/2007 que se deberían adaptar a los criterios de las normas ISO 1996 para mejorar la representatividad de los resultados de las mediciones y su reproducibilidad.

ABSTRACT

The ISO 1996 family of standards constitutes the reference framework for the evaluation of environmental noise. Born as an ISO Recommendation in 1971, in its successive editions it has incorporated advances in knowledge about the measurement and subsequent evaluation of environmental noise, and its criteria are recognized and accepted by the international scientific community.

On the other hand, the measurement procedures specified in RD 1367/2007 are based, fundamentally, on the previous experience in environmental noise measurements provided by various institutions, both from the public administration and the private sector, that collaborated in its drafting. These criteria coincide in some cases with those specified in the latest editions of the ISO 1996 standards, but in other cases they differ significantly.

In this communication, both regulations are analyzed and compared, and the aspects of RD 1367/2007 that should be adapted to the criteria of the ISO 1996 standards are identified to improve the representativeness of the measurement results and their reproducibility.

Palabras Clave— Ruido ambiental, mediciones acústicas, incertidumbre de medida.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica es uno de los problemas medioambientales más importantes de la sociedad actual. En contra de lo que podría pensarse, el ruido ambiental no es simplemente una cuestión de confort, sino que afecta de una manera importante la salud de las personas que lo sufren [1]. Para hacerse una idea de la magnitud del problema basta con decir que, en Europa, el 20 % de la población vive en zonas en las que los niveles sonoros son considerados perjudiciales para la salud y que provocan, como efectos más importantes, molestias severas a más de 22.000.000 de sus habitantes, alteraciones del sueño a más de 6.500.000 de personas, unas 48.000 cardiopatías y unos 12.000 casos de muerte prematura al año [2].

Por esta razón, las administraciones llevan décadas estableciendo políticas destinadas a reducir la contaminación acústica basadas en la gestión y el control del ruido en las zonas donde las personas realizan sus actividades habituales. Estas políticas necesitan herramientas de evaluación precisas para analizar la magnitud del problema y cuantificar las mejoras obtenidas en las acciones de control realizadas.

En la mayoría de las ocasiones, la evaluación del ruido ambiental se basa en mediciones acústicas realizadas por las propias administraciones o por empresas y profesionales en los que dichas administraciones delegan. Para que estas mediciones sean útiles para el fin previsto, sus resultados deben tener suficiente precisión, es decir, deben ser repetibles (dos resultados de medición realizados sobre el mismo ítem por el mismo operador deben ser compatibles entre sí) y reproducibles (dos resultados de medición realizados sobre el

* **Autor de contacto:** antonio.pedrero@upm.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

mismo ítem por laboratorios o profesionales diferentes deben ser compatibles entre sí).

En metrología se entiende la compatibilidad como una propiedad de los resultados de medida tal que el valor absoluto de la diferencia de cualquier par de valores medidos sea inferior a la incertidumbre de dicha diferencia [3]. Los métodos y procedimientos de medición deben ser capaces, por tanto, de proporcionar resultados de medida correctos y con una incertidumbre de medida acotada que permita esta compatibilidad.

El objetivo de las mediciones de ruido ambiental es caracterizar el ambiente acústico en uno o más puntos basándose en la determinación de unos índices acústicos determinados. Por eso, las condiciones acústicas durante la medición deberían ser representativas de las condiciones habituales del entorno, tanto si se desean obtener los promedios a largo plazo como si se pretende determinar los niveles máximos.

La casuística, en este tipo de ensayos, es tan amplia que no es posible establecer un procedimiento de medida genérico que sirva en todos los casos, sino que es necesario definir, para cada ocasión, la estrategia de medida más adecuada. Esto requiere una mayor cualificación para las personas que realizan este tipo de ensayos que la que se necesita para otros tipos de mediciones acústicas.

Desde hace décadas, la comunidad científica internacional está tratando de establecer unas directrices generales para las mediciones de acústica ambiental que garanticen una buena reproducibilidad y que mantengan la incertidumbre de medida dentro de unos límites controlados. El resultado de este empeño es la familia de normas ISO 1996, que nacieron como ISO Recommendation en 1971 y que han ido adaptándose en sus sucesivas ediciones al avance del conocimiento científico sobre el tema y al desarrollo técnico de los aparatos de medida. En la actualidad, la norma consta de dos partes. La primera parte describe las magnitudes acústicas relevantes y los métodos generales de evaluación [4], y la segunda proporciona directrices para la medición de los niveles sonoros y establece los métodos para determinar la incertidumbre de medida en cada caso, en función del esfuerzo de medición adoptado por el usuario [5].

En España, los procedimientos para la medición del ruido ambiental surgieron en las primeras Ordenanzas Municipales, que datan de finales de los años 60. Estos procedimientos estaban indicados, fundamentalmente, para la evaluación los focos sonoros que generaban denuncias por parte de la población, que en los primeros tiempos eran básicamente los

locales de pública concurrencia. Dichas Ordenanzas, y sus protocolos de medición correspondientes, se fueron actualizando con el tiempo, pero los cambios tuvieron más que ver con las posibilidades técnicas que ofrecían los nuevos aparatos de medición (por ejemplo, el uso del L_{Aeq} en lugar de los niveles instantáneos Fast o Slow para valorar los niveles sonoros) que con proponer metodologías de medida apropiadas para caracterizar otros tipos de emisores acústicos.

El RD 1367/2007 [6] constituyó un hito importante en la evaluación y la gestión del ruido ambiental en España ya que unificó los criterios de evaluación en todo el territorio nacional. Este documento insiste en la necesidad de que las mediciones se adecuen a las características de los emisores acústicos para que la evaluación sea representativa de su comportamiento^{2,3} pero propone procedimientos de medición en los que establece unos criterios mínimos en cuanto al número y la duración de las mediciones, que son aplicados a rajatabla por la mayoría de los laboratorios de ensayo, independientemente de la naturaleza y de las características del foco sonoro evaluado. También se detectan en sus protocolos de medida algunos aspectos que se fundamentan más en las costumbres heredadas de las antiguas Ordenanzas Municipales que en el conocimiento técnico que se ha ido desarrollando a lo largo de los años.

La consecuencia es que, en general, la aplicación directa de los procedimientos de medida propuestos en el RD 1367/2007 produce resultados de medida con muy baja reproducibilidad, tal y como se constata en los ejercicios de intercomparación que se realizan periódicamente en España.

2. FACTORES QUE AFECTAN A LA DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS DE MEDIDA EN ENSAYOS DE RUIDO AMBIENTAL

Antes de analizar comparativamente los métodos de medida propuestos en las normativas objeto de estudio en esta comunicación, conviene establecer qué factores pueden hacer que dos mediciones diferentes realizadas sobre el mismo ítem, en un determinado punto de medida, arrojen resultados diferentes.

2.1. Condiciones de operación del foco sonoro

La emisión acústica de los focos sonoros no suele ser uniforme a lo largo del tiempo. En el ámbito industrial, la maquinaria puede tener distintos regímenes de

evaluando en el periodo temporal de evaluación”.

³ ANEXO IV: “Para la determinación de los niveles sonoros promedios a largo plazo se deben obtener suficientes muestras independientes para **obtener una estimación representativa** del nivel sonoro promediado de largo plazo”.

² ANEXO IV: “Cuando en la medición se apliquen métodos de muestreo del nivel de presión sonora, para cada periodo temporal de evaluación, día, tarde, noche, se seleccionarán, atendiendo a las características del ruido que se esté evaluando, el intervalo temporal de cada medida T_i , el número de medidas a realizar n y los intervalos temporales entre medidas, de forma que **el resultado de la medida sea representativo** de la valoración del índice que se está

funcionamiento, con diferentes características de emisión sonora cada uno de ellos. Esto no solo aplica a los focos sonoros de origen industrial. Por ejemplo, las infraestructuras de transporte tales como carreteras, vías férreas o aeropuertos, presentan diferentes características de tráfico a las distintas horas del día, o en los distintos días de la semana, o incluso en las diferentes épocas del año.

Si lo que queremos caracterizar es el promedio de la afección de estos focos sonoros es necesario evaluar todas sus condiciones de operación y tener en cuenta los tiempos de prevalencia de cada una de ellas. Por otra parte, si la intención es determinar la máxima afección, se debe elegir cuidadosamente la condición de máxima emisión y centrar en ella la evaluación.

2.2. Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas afectan de una manera importante a la propagación sonora en exteriores. Sus efectos han sido ampliamente estudiados y son bien conocidos [7]. De entre todos los factores meteorológicos, los más influyentes son los gradientes de temperatura y, sobre todo, la dirección y velocidad del viento. La combinación de ambos factores genera zonas de sombra en la dirección opuesta a la del viento en las que se producen grandes atenuaciones de la energía acústica. De la misma manera, se producen aumentos de los niveles sonoros cuando la propagación se produce en la dirección del viento, pero de magnitud muy inferior. Estos efectos son más importantes cuanto mayor es la distancia entre la fuente sonora y el punto de observación.

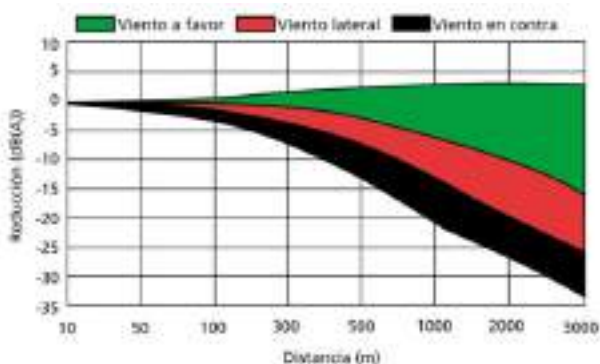


Figura 1. Efecto del viento en función de su dirección y de la distancia al punto de observación [8].

La Figura 1 ilustra estos conceptos. Por ejemplo, puede observarse que a una distancia de 1 km del foco sonoro se pueden producir atenuaciones de más de 20 dB cuando el viento sopla en contra de la dirección de propagación, mientras que la amplificación producida para esa distancia con el viento a favor no excede los 3 dB. Esta es la razón de que las mediciones acústicas sean más precisas en la

dirección del viento, en lo que se conoce como condiciones favorables de propagación.

3. MEDICIONES EN EXTERIORES

De lo expresado anteriormente se desprende que el resultado de una medición particular de los niveles sonoros sólo es representativo de las condiciones de operación y de las condiciones meteorológicas que se daban en el momento de la medición y podría ser muy diferente si se hubieran dado otras condiciones. Para obtener un resultado representativo del promedio a largo plazo del nivel de presión sonora se deben tener en cuenta todas las posibles condiciones de operación de los focos sonoros y todas las posibles condiciones meteorológicas.

En la experiencia de este autor, la mayoría de las evaluaciones realizadas según el RD 1367/2007 y los Documentos Normativos desarrollados a partir de él, adolecen de un análisis deficiente de estos aspectos a la hora de planificar las campañas de mediciones. Son pocas en las que se obtienen muestras en todas las condiciones de operación del foco sonoro y casi ninguna tiene en consideración las condiciones meteorológicas, probablemente porque no se hace referencia expresa a ellas en dichas reglamentaciones. Esto tiene como consecuencia un resultado sesgado a las condiciones específicas en las que se realizaron las mediciones, que podría no ser representativo de la afección producida por el foco sonoro evaluado.

Para obtener un resultado representativo del promedio a largo plazo del nivel de presión sonora, la norma ISO 1996 nos propone dos posibles estrategias: las mediciones a largo plazo y el muestreo a partir de mediciones a corto plazo. En el primer caso, la duración de la medición debería ser tal que contuviese **una muestra representativa** de las condiciones de operación (ventanas de operación) y meteorológicas (ventanas meteorológicas) posibles. En el segundo caso se deben tomar muestras en **todas y cada una** de las posibles combinaciones de ventanas de operación y ventanas meteorológicas, por ejemplo, cumplimentando una tabla como la de la Figura 2, en la que para cada una de las celdas habría que disponer de varias muestras independientes cuyos resultados se promediarían energéticamente.

Ventana meteorológica	1	2	3	4
Ventana de emisión				
1				
2				
3				

Figura 2. Estratificación de las condiciones de operación y de las condiciones meteorológicas durante las mediciones [5].

El resultado de la campaña de mediciones es el promedio de los niveles sonoros obtenidos las diferentes celdas, ponderado por la probabilidad de ocurrencia de las condiciones de operación y de las condiciones meteorológicas correspondientes. Las componentes de

incertidumbre debidas a las condiciones de operación, u_{sou} , y a las condiciones meteorológicas, u_{met} , se obtienen conjuntamente de la propia variabilidad de los resultados obtenidos.

Si lo que se pretende es determinar la máxima afección del foco sonoro se deberían realizar una o varias mediciones en las condiciones de operación de máxima radiación sonora y en condiciones favorables de propagación (ventanas meteorológicas M3 o M4 de la norma ISO 1996). La medición en otras condiciones meteorológicas (ventanas M1 o M2) podría infravalorar los niveles sonoros reales y además no permitiría determinar la incertidumbre de medida.

4. MEDICIONES EN INTERIORES

El nivel de presión sonora en el interior de los recintos se rige por los modos propios, que establecen patrones en los que se alternan máximos y mínimos de presión sonora a lo largo del recinto y que son diferentes para cada frecuencia. En frecuencias altas los modos están tan solapados que sus efectos se compensan entre sí, sin embargo, para medias y bajas frecuencias las diferencias del nivel de presión sonora entre diferentes puntos pueden ser importantes. El pretendido objetivo de buscar el punto de máxima afección en el interior de un recinto, que subyace en el RD 1367/2007, es una tarea prácticamente imposible cuando el contenido espectral de la señal sonora no es totalmente estable, ya que los patrones modales son diferentes en cada momento en función de las frecuencias de excitación del recinto y de sus amplitudes relativas en ese preciso momento.

Por esta razón, para caracterizar el nivel sonoro en un recinto no debería usarse el resultado de la medición en un único punto sino el promedio de un muestreo espacio-temporal del nivel sonoro en distintos puntos de dicho recinto. Se ha demostrado [9] que, para recintos de las dimensiones habituales de los edificios de uso residencial se obtiene un muestreo representativo del campo sonoro si se utilizan cinco posiciones de micrófono distribuidas aleatoriamente a lo largo del área en la que el campo sonoro puede asimilarse a un campo difuso, es decir, suficientemente alejadas de las superficies límite para evitar el conocido como efecto Waterhouse [10], y suficientemente alejadas de las posibles vías de transmisión sonora para evitar la preponderancia de la radiación directa. Este procedimiento, que se utiliza habitualmente para mediciones de aislamiento acústico donde la radiación de energía acústica es estacionaria, podría no ser apropiado para mediciones de ciertos focos sonoros habituales en acústica ambiental, sobre todo si producen eventos discretos de ruido que no sean fáciles de replicar durante la medida en cada una de las cinco posiciones de medida.

Con objeto de encontrar un procedimiento de medida en interiores que se adaptase a las particularidades de las mediciones de ruido ambiental y que garantizase una buena

reproducibilidad, se realizó un estudio que comparaba en términos de precisión, fundamentalmente en las bajas frecuencias, un gran número de procedimientos encontrados en diferentes normativas y documentaciones técnicas. Este estudio, que se plasmó en la recomendación NT No. 1347-97 [11], concluyó con una propuesta basada en tres puntos de medida, uno en esquina y dos en la zona de campo difuso, que ha sido adoptado en la mayoría de las normativas y reglamentaciones actuales, entre ellas la ISO 1996.

Otro de los aspectos controvertidos del procedimiento de medida en interiores del RD 1367/2007 son las indicaciones que se realizan sobre la elección de la ubicación de los puntos de medida. Se especifican unas distancias mínimas de 1 m a las paredes y a otros elementos reflectantes, 1,5 m a las ventanas y entre 1,2 y 1,5 m de altura sobre el suelo. Estas distancias, complementadas con una suficiente separación entre puntos de medida, son adecuadas para detectar el contenido de baja frecuencia del sonido recibido en la zona de campo difuso, pero son difíciles de respetar en algunas habitaciones de dimensiones reducidas. Lo que es cuestionable desde el punto de vista acústico es la alternativa que se propone cuando no se pueden cumplir estas distancias mínimas, que es realizar una única medición en el centro del recinto. El centro geométrico del recinto es un punto con un comportamiento acústico singular, ya que se producen máximos de todos los modos propios pares y nulos de todos los modos impares, por lo que no suele ser representativo del comportamiento acústico del recinto en su globalidad.

La norma ISO 1996 adopta la filosofía de la recomendación NT No. 1347-97 para mediciones en el interior de las edificaciones. La captación de la baja frecuencia en el micrófono de esquina, donde se producen máximos de todos los modos propios, relaja los requisitos de distancias entre los otros dos puntos de medida, así como sus distancias a las superficies límite y a las ventanas u otros elementos de transmisión, lo que hace más viable el cumplimiento con estas distancias mínimas en los recintos pequeños.

5. DURACIÓN DE LAS MEDICIONES

La duración de las mediciones afecta a la precisión de los resultados. Incluso cuando las señales acústicas que se quieren medir son estacionarias temporalmente se necesita un cierto tiempo de promediado para obtener una determinación correcta de los niveles eficaces de dichas señales. Este tiempo está condicionado por el ancho de banda de los filtros cuando se realiza análisis en frecuencia del sonido, como es el caso del análisis de componentes tonales en el RD 1367/2007, debiendo cumplirse que

$$BT \gg 1 \quad (1)$$

donde B es el ancho de banda del filtro, en Hz y T es el tiempo de integración.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la mayoría de los focos sonoros que se contemplan en las mediciones de

acústica ambiental producen una emisión acústica que no es estacionaria, sino que presenta variaciones de nivel sonoro en función del tiempo. En las mediciones a corto plazo, el tiempo de medida debería ser suficientemente largo como para cubrir todas las variaciones significativas de la emisión del ruido en la ventana de operación correspondiente. Este tiempo puede ser muy diferente para distintos focos sonoros por lo que no es conveniente fijar el tiempo de medición a priori, sino que se debería observar durante la medición que el promedio temporal de la energía acústica (el L_{Aeq}) se ha estabilizado, dentro de un margen razonable, en el periodo de observación (Figura 3).

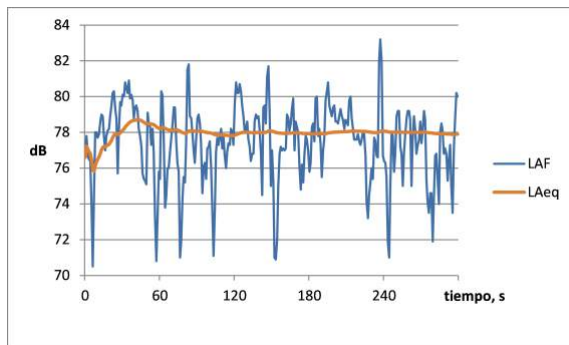


Figura 3. Ejemplo de la evolución temporal del L_{AF} y del L_{Aeq} para un ruido no estacionario.

Además, si las mediciones se realizan a distancias del foco sonoro para las que las condiciones climatológicas afectan a la propagación sonora, hay que tener en cuenta que dichas condiciones tampoco permanecen constantes, por lo que el tiempo mínimo de medida debería permitir promediar las condiciones meteorológicas reales. Para este caso la norma ISO 1996 especifica un tiempo mínimo de medición de 10 minutos.

A pesar de que el RD 1367/2007 expresa claramente que las indicaciones en cuanto a la duración de las mediciones son valores mínimos, muchos laboratorios aplican esos valores independientemente de la naturaleza del foco sonoro y de la posible influencia de las condiciones meteorológicas.

En cuanto a la medición del ruido producido por las infraestructuras de transporte, su duración se debería enfocar más a garantizar un determinado número de eventos en el periodo de medición que a fijar un tiempo de medida mínimo, ya que es el número de eventos considerados lo que condiciona la componente de incertidumbre debida a las condiciones de operación, u_{sou} .

En los casos en los que predominan los ruidos producidos por sucesos aislados, tales como pasos de trenes o sobrevuelos de aeronaves y se requiere evaluar la contribución de dichos sucesos al nivel sonoro total la estrategia de medida preferida es determinar los Niveles de Exposición Sonora (L_{AE}) de cada uno de los sucesos y calcular a partir de ellos el valor del L_{Aeq} en el periodo de referencia. Esto evita incluir en el resultado de la medición la

energía acústica que se produce en los periodos entre eventos, que, obviamente, no es atribuible al foco sonoro que se está evaluando.

6. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

El resultado de cualquier medición es solo una aproximación al valor verdadero de la magnitud que se quiere caracterizar, el mensurando. La incertidumbre de medida expresa la duda que se tiene de que dicho resultado represente al mensurando en términos del margen posible de variación y del nivel de confianza asociado a ese margen.

Si no se aporta la incertidumbre de medida, el resultado de la medición está incompleto ya que no se indican los intervalos en los que se podría encontrar el valor verdadero de la magnitud medida, de manera que dicho resultado no se podría emplear, por ejemplo, para evaluar si se cumple o se incumple un determinado límite.

Las mediciones de ruido ambiental están sujetas a diversos factores que condicionan la incertidumbre de medida. A diferencia de otros tipos de mediciones en los que se puede realizar una estimación genérica de la incertidumbre, sus componentes más importantes en los ensayos de acústica ambiental se deben a la naturaleza específica del foco sonoro a investigar y a las condiciones del entorno de medición. Esto hace que sea necesario estimar la incertidumbre para cada ensayo en particular.

Afortunadamente, en la actualidad existe un conocimiento suficiente de las principales componentes de incertidumbre en los ensayos de ruido ambiental y de cómo cuantificarlas. La versión en vigor de la norma ISO 1996-2 contiene la información necesaria a este respecto como para hacer una correcta estimación de la incertidumbre de medida en las condiciones habituales de este tipo de ensayos.

También existen directrices metrológicamente fundamentadas para realizar las declaraciones de conformidad con respecto a los valores límite. El documento ILAC G8:09/2019 [12] ofrece diferentes alternativas en las que se cuantifica el riesgo asociado a la decisión para cada una de ellas.

7. CONCLUSIONES

Las mediciones acústicas son la herramienta fundamental para la evaluación de la contaminación sonora. Dada la importancia de este aspecto para la salud de las personas, las mediciones tienen que ser lo más precisas posible en términos de repetibilidad como en términos de reproducibilidad.

Las mediciones de ruido ambiental son complejas ya que la casuística es tan amplia que no se puede establecer un procedimiento de medida general que sea apropiado en todos los casos. Por eso necesitan de un nivel de competencia elevado para los técnicos que las llevan a cabo.

El RD 1367/2007 supuso un hito importante en la gestión y el control de la contaminación acústica ya que, entre otros aspectos, uniformizó los criterios de evaluación del ruido en todo el territorio nacional. Dichos criterios heredaron la experiencia previa en la realización de mediciones acústicas que las administraciones y los laboratorios habían ido adquiriendo durante décadas.

Por su parte, la familia de normas ISO 1996 se ha ido actualizando a lo largo del tiempo para adaptarse a los avances del conocimiento sobre mediciones de acústica ambiental y a las posibilidades técnicas de los nuevos equipos de medición. Esta familia de normas tiene como objetivo contribuir a la armonización internacional de los métodos de descripción, medición y evaluación del ruido ambiental, proporcionando a las autoridades criterios sólidos y científicamente contrastados para desarrollar normas nacionales y reglamentos, así como para establecer los límites de ruido correspondientes.

En estos años de aplicación del RD 1367/2007 se han detectado aspectos mejorables que podrían solventarse con la aplicación de los criterios de las versiones en vigor de las normas ISO 1996.

En cuanto a las medidas en exteriores, que en ocasiones adolecen de falta de representatividad a la hora de evaluar la afeción sonora producida por los focos sonoros sujetos a evaluación, debería sistematizarse la estratificación de las condiciones de medición en función de las combinaciones de ventanas de operación y ventanas meteorológicas.

Las mediciones en interiores ganarían en reproducibilidad si se aplicase el método de tres puntos de medida, uno en esquina y dos en la zona del campo reverberante, siendo el resultado de la medición el promedio de las mediciones realizadas.

Con respecto a la duración de la medición, la indicación de valores mínimos expresada a lo largo del texto del RD 1367/2007 se ha tornado en contraproducente ya que en numerosas ocasiones se aplican incorrectamente, por no tener en cuenta las características particulares de emisión del foco sonoro evaluado y las del entorno de medición. Por otra parte, debería prescribir, al menos como opción, la caracterización de los emisores acústicos que producen eventos sonoros aislados a partir de la medición del Nivel de Exposición Sonora, L_{AE} , de los eventos individuales.

Finalmente, es necesario mencionar la necesidad, por rigor metrológico, de estimar la incertidumbre de medida en los ensayos de ruido ambiental. Este es uno de los puntos clave de la norma ISO 1996-2, que proporciona información detallada de las componentes de incertidumbre mínimas que se deben considerar y de cómo cuantificarlas. La determinación de la incertidumbre de medida es la base para una correcta decisión sobre el cumplimiento o incumplimiento de los resultados de medición con respecto a los límites legales. A partir de ella, y aplicando los métodos apropiados para la declaración de conformidad [12], se podrá realizar una declaración de cumplimiento o incumplimiento

correcta en la que se conocen y se aceptan los riesgos de la decisión tomada, basados en las probabilidades de falsa aceptación y de falso rechazo.

8. REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*, World Health Organization. Regional Office for Europe, 2011.
- [2] E. Peris, *Environmental noise in Europe: 2020*, Eur. Environ. Agency, Copenhagen, 2020.
- [3] Centro Español de Metrología, *Vocabulario internacional de metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. 3ª Ed., JCGM, Madrid, 2012.
- [4] ISO 1996-1:2016, International Standards Organization, "Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures", Ginebra, 2016.
- [5] ISO 1996-2:2017, International Standards Organization, "Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of sound pressure levels", Ginebra, 2017.
- [6] Gobierno de España, "Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas", *BOE* nº 254. de 23/10/2007. Madrid, 2007.
- [7] J. E. Piercy, T. F. W. Embleton and L. C. Sutherland, "Review of noise propagation in the atmosphere", *J. Acoust. Soc. Am.*, 61 (6): 1403–1418, 1977.
- [8] Bruel and Kjaer, *Ruido Ambiental*, Copenhagen, 2002.
- [9] Olesen, H.S. *Measurement of the acoustical properties of buildings - additional guidance*, Nordtest NT Technical Report 203. NT Project No. 963-91, Espoo, 1992.
- [10] Waterhouse, R.V., "Interference patterns in reverberant sound fields", *J. Acoust. Soc. Am.*, 27 (2), 247–258, 1955.
- [11] Simmons, C. *Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions. Proposal for New Procedures*. NT Project No. 1347–97, Oslo, 1997.
- [12] ILAC G8:09/2019. *Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity*; International Laboratory Accreditation Cooperation: Silverwater, 2019



PROPUESTAS PARA LA REVISIÓN DEL RD 1367/2007 EN EL ÁMBITO DE LA ACÚSTICA DE LA EDIFICACIÓN. COORDINACIÓN CON EL DB-HR DEL CTE

Amelia Romero Fernández^{1*}
Belén Casla Herguedas¹
Teresa Carrascal García¹

¹ Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. IETcc – CSIC. Madrid. España

RESUMEN

El RD 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley 37/2003 del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, está en proceso de revisión técnica. Para llevar a cabo esta revisión se ha establecido una estructura de trabajo en torno a diferentes subgrupos técnicos de trabajo específicos que aborden las diferentes materias acústicas relacionadas con este reglamento; uno de ellos es el subgrupo “Contaminación acústica en la edificación”.

En esta comunicación se exponen algunas de las propuestas que se están trabajando en este subgrupo, en el contexto del ruido de las instalaciones y en coordinación con el Documento Básico DB HR Protección frente al ruido del CTE, donde se regulan las condiciones acústicas en los edificios.

Se tratan cuestiones como definiciones específicas en la edificación, los objetivos de calidad acústica y los valores límite de ruido en el interior de las edificaciones o la metodología de ensayo para la evaluación de los emisores acústicos, abordando de forma específica su aplicación a las instalaciones de los edificios.

ABSTRACT

RD 1367/2007, which develops Noise Law 37/2003, regarding acoustic areas, quality objectives and acoustic emissions, is being technically reviewed. To perform the review required, a working structure has been established around different specific technical working subgroups that address the different acoustic matters related to this regulation; one of them is the subgroup “Noise pollution in buildings”.

This paper presents some of the proposals being worked on in this subgroup, regarding noise from building services, and in coordination with the Basic Document DB HR Protection against noise of the Spanish Building Code, where the acoustic conditions in buildings are regulated.

Issues such as specific definitions in the building, acoustic quality objectives and noise limit values inside buildings or the testing methodology for the evaluation of acoustic emitters are discussed, specifically addressing their application to building services.

Palabras Clave— RD 1367/2007, Ley 37/2003 del Ruido, ruido de instalaciones, reglamentación, DB HR.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido ambiental se considera uno de los principales problemas ambientales que afectan a la salud y el bienestar de las personas y preocupa cada vez más tanto a los responsables políticos como a la población en general [1,2]. A pesar de ello, el ruido no ha sido tradicionalmente objeto de atención prioritaria en la normativa de protección del medio ambiente y no ha existido una norma reguladora de ámbito estatal hasta la llegada de la Ley 37/2003 del Ruido [3]. Posteriormente, en 2007, el RD 1367 [4] vendría a completar el desarrollo de esta Ley, definiendo índices de ruido y de vibraciones, sus aplicaciones, efectos y molestias sobre la población y su repercusión en el medio ambiente; delimitando los distintos tipos de áreas y servidumbres acústicas y estableciendo los objetivos de calidad acústica para cada área (OCA), incluyéndose el espacio interior de las edificaciones; y regulando los emisores acústicos fijando valores límite de emisión o de inmisión así como los procedimientos y los métodos de evaluación de ruidos y vibraciones.

El desarrollo de este marco reglamentario en España ha sido muy importante, pues ha permitido que las autoridades competentes dispongan de herramientas para la gestión del ruido con el objetivo final de proteger a los ciudadanos de la contaminación acústica y de conseguir un medio ambiente más saludable.

Por otra parte, en materia de acústica de la edificación, es el Documento Básico DB HR Protección frente al ruido del

* **Autor de contacto:** aromero@ietcc.csic.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

CTE [5] el que regula las condiciones acústicas en los edificios, incluyendo lo referente a la protección frente al ruido de las instalaciones mediante la referencia a este RD 1367/2007 que es el que contiene los valores límite de ruido transmitido a locales colindantes por actividades y/o instalaciones, además de indicar el procedimiento de ensayo y valoración. A pesar de que ambos reglamentos se desarrollaron simultáneamente y se coordinó su redacción, hay algunos aspectos susceptibles de mejora a la vista de la experiencia adquirida en estos años. En esta comunicación se plantean algunas de estas cuestiones.

A fecha de hoy, tanto la experiencia de las autoridades competentes en el manejo del RD 1367 desde su aprobación y la detección de puntos problemáticos y dificultades en su aplicación, así como la mejora de la tecnología y del conocimiento en materia de gestión del ruido ambiental han puesto de manifiesto que existe un margen de mejora importante en la redacción de este texto, por lo que desde el MITERD (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) se ha iniciado un proceso de revisión de todo su contenido.

Este proceso de revisión se inició con una Consulta Pública Previa (febrero 2022) para recoger las opiniones de los ciudadanos, organizaciones y asociaciones afectados por la aplicación, alcance y desarrollo de esta norma y procesándolas junto al resto de contribuciones previas aportadas con anterioridad por las Comunidades Autónomas y otros organismos competentes. Tras el análisis de todas las contribuciones recogidas, y dado el alcance de las modificaciones que se intuyen, es previsible que sea necesario redactar y aprobar un nuevo Real Decreto en sustitución del anterior con el objeto de obtener una norma final más eficaz en su aplicación, con herramientas más adecuadas para la evaluación de la contaminación acústica a disposición de las autoridades competentes.

Para abordar esta tarea se ha creado una estructura de trabajo compuesta por un grupo de trabajo principal y varios subgrupos de trabajo técnicos específicos que aborden las distintas cuestiones a tratar agrupadas por materias acústicas de su especialidad. Uno de estos subgrupos de trabajo es el de “Contaminación acústica en la edificación”. En esta comunicación se exponen algunas de las cuestiones, problemas detectados y planteamientos que se están trabajando en el seno de este subgrupo en el contexto del ruido de las instalaciones y en coordinación con el Documento Básico DB HR.

2. EL RD 1367/2007 Y SU RELACIÓN CON EL DB HR. PROBLEMÁTICA DETECTADA

Los dos reglamentos, DB HR y RD 1367/2007 (desarrollo reglamentario de la Ley del Ruido), se desarrollaron simultáneamente en el tiempo y determinados aspectos de su redacción, en los que ambas partes tenían competencias y se relacionaban entre sí, se coordinaron para conseguir un

enfoque coherente de la regulación acústica desde sendos frentes, el medioambiental y el de la edificación. Para ello se incluyeron referencias a la Ley del Ruido en el DB HR y viceversa. Uno de estos aspectos es el referente a la protección de los usuarios con respecto al ruido procedente del exterior (tema relacionado con los aislamientos de fachada) y el ruido procedente de las instalaciones (que dan servicio al edificio).

La figura siguiente muestra esta relación entre ambos reglamentos y su cruce de contenidos. El DB HR contiene referencias a la Ley 37/2003 del Ruido y da una serie de indicaciones que pueden ser consideradas buenas prácticas en lo que respecta a la protección del ruido y vibraciones de las instalaciones. Sin embargo, es el RD 1367/2007 el que establece los objetivos de calidad acústica aplicables al espacio interior de las edificaciones y los valores límite de ruido transmitido a locales colindantes por actividades (o instalaciones) así como los métodos de evaluación de los diversos índices acústicos.



Figura 1. Relación entre el RD 1367/2007 y el DB HR y contenidos relacionados con el ruido de las instalaciones en los edificios en ambos reglamentos.

En los últimos años el Grupo de Acústica de la Unidad de Calidad en la Construcción del IETcc-CSIC ha desarrollado una línea de trabajo sobre las prestaciones acústicas y los niveles de ruido producidos por las instalaciones en los edificios. Se han estudiado las instalaciones más comunes en edificios de viviendas de nueva construcción (posteriores a la entrada en vigor del DB HR y del RD1367), analizando las características de los equipos y su implantación en el edificio, realizando mediciones de los niveles de ruido producidos y transmitidos a los recintos colindantes y aplicando, en la medida de lo posible, lo dispuesto en el RD 1367 para verificar su cumplimiento. Se han analizado distintos tipos de instalaciones [6-9]: hidráulicas, ya sean de suministro o evacuación de aguas; de ventilación, como extractores de

humos de garaje o sistemas de ventilación mecánica; instalaciones de climatización (calefacción/refrigeración); y otras instalaciones habituales como ascensores o puertas de garaje automatizadas.

Este trabajo nos ha permitido identificar determinados problemas en relación a la aplicación del RD 1367 al ruido de las instalaciones en los edificios, así como algunos aspectos de compatibilidad y de interpretación junto con el DB HR de Protección frente al ruido. De esta forma podemos analizar y establecer los principios para una propuesta que mejore el DB HR, así como participar en los trabajos de revisión del RD 1367, liderada por el MITERD. Nuestra participación va de la mano del MITMA (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana) liderando el grupo de trabajo de “Contaminación acústica en la edificación”. Es importante que ambos reglamentos se revisen en paralelo y se aborden las distintas cuestiones teniéndose en cuenta el uno al otro y adaptando la redacción de sendos reglamentos en aquellos temas que sean de su competencia.

2.1. Referencias cruzadas entre reglamentos

Como ya se avanzaba en la figura 1 hay contenidos interrelacionados entre el DB HR y el RD 1367. Hay una referencia cruzada de vital importancia pues es relativa al cumplimiento de los requisitos relacionados con el ruido. Por una parte, el DB HR (Apartado 2, párrafo 2) indica que el cumplimiento de las exigencias del DB HR conlleva el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica del espacio interior de la Ley del Ruido y sus desarrollos complementarios (RD 13670); por otra parte, es el RD 1367 el que establece (art. 17) que una edificación es conforme con los objetivos de calidad acústica aplicables al espacio interior de las edificaciones al aplicar el sistema de verificación acústica de las edificaciones establecido en el CTE y cumplir sus exigencias.

El problema está en que el cumplimiento del DB HR puede no suponer el cumplimiento de los niveles de inmisión de ruido de instalaciones en los recintos por varios motivos pues ni el DB HR puede considerarse un sistema de verificación acústica en cuanto al ruido de las instalaciones, ya que se limita a dar una serie de condiciones generales de diseño, ejecución y montaje; ni existe experiencia suficiente en la validación de estas buenas prácticas constructivas como para tener las garantías del cumplimiento de los niveles de ruido establecidos en el RD 1367.

2.2. Consideración de las instalaciones del edificio en el articulado del RD 1367/2007

Una de las observaciones más generales que podemos hacer es cómo interpretar que quedan reguladas las instalaciones en el RD 1367 pues existe un problema a la hora de identificar a las instalaciones de los edificios como emisores acústicos dentro su articulado para así establecer correctamente los

requisitos que recaen sobre ellas en materia de objetivos de calidad acústica y niveles límite; parece, por tanto, necesario que éstas se definan adecuadamente.

En la actualidad para aplicar el RD 1367 es necesario “interpretar” que las instalaciones del edificio se entienden englobadas dentro del concepto “actividades”, que se va mencionando a lo largo de todo el articulado. Resulta fundamental distinguir las instalaciones del edificio de la interpretación actual de “instalación” entendida como recinto o establecimiento provisto de los medios necesarios para llevar a cabo una actividad profesional o de ocio, por ejemplo, instalaciones educativas o deportivas, lo cual puede resultar confuso, pero es la interpretación que parece desprenderse de la redacción del RD 1367.

De esta forma, en el RD 1367 la Tabla B del Anexo II establece los objetivos de calidad acústica aplicables al interior de los recintos y se refieren a la totalidad de los emisores acústicos que inciden en ellos, incluyéndose textualmente las “instalaciones del propio edificio”. Sin embargo, la Tabla B2 del Anexo III, que indica los valores límite de ruido transmitido a locales colindantes se refiere a “actividades” y no tan explícitamente a “instalaciones”.

Este problema de interpretación se da no sólo en el momento de conocer adecuadamente las exigencias sino también a la hora de realizar las mediciones y evaluar adecuadamente los ruidos producidos por instalaciones dentro de los edificios, pues se interpreta que deben seguirse las mismas indicaciones que se aplican en el caso de ruidos procedentes de las actividades comerciales o industriales; el procedimiento de medida de los niveles de ruido de instalaciones y equipamiento de los edificios no está suficientemente desarrollado y claro en la norma actual y no se aborda la especificidad de los distintos tipos de instalaciones que requieren de un procedimiento de medición más detallado y concreto.

2.3. Aplicabilidad y cumplimiento de OCAs y valores límite para el ruido de las instalaciones

Existe cierta confusión a la hora de determinar si las instalaciones de los edificios deben cumplir los objetivos de calidad acústica (OCAs) aplicables al espacio interior de las edificaciones además de cumplir con los valores límite de ruido transmitido a locales colindantes. A esto se le suma la dificultad de la verificación del cumplimiento de los OCAs en los espacios interiores que, desde el punto de vista de las instalaciones del edificio, plantean varios inconvenientes. El OCA contempla la totalidad de emisores acústicos que inciden desde el recinto, ya sean focos de ruido exterior ambiental o focos de ruido interiores como lo son las instalaciones, y no están asociados a ningún emisor concreto. No se puede, por tanto, discriminar ni imputar responsabilidades ante un problema de ruido, ni definir soluciones de mejora. Sin embargo, los valores límite

permitirían una alternativa de medición viable ante focos de ruido concretos y conocidos.

En relación a la aplicación del artículo 25 para verificar el cumplimiento de los valores límite, convendría revisar en qué términos se puede aplicar en el caso de las instalaciones. Atendiendo a las características de las distintas instalaciones puede ser complicado establecer un valor representativo promedio anual o diario porque no se puede determinar a priori el número de eventos de ciertas instalaciones (evacuación de aguas, ascensores, puertas o ventanas motorizadas, etc.) que puede haber en un día o año, ya que depende de muchos factores (ocupación, intensidad de uso de los equipos, periodo del día, condiciones climáticas, etc.)

3. PROPUESTAS EN RELACIÓN AL RUIDO DE LAS INSTALACIONES PARA LA REVISIÓN DEL RD 1367/2007

En respuesta a las dificultades de aplicación del RD 1367/2007 a las instalaciones de los edificios se pueden plantear algunas propuestas para afrontar la nueva redacción de este reglamento.

Debemos incidir en que el tema debe abordarse con un enfoque global desde los dos ministerios y reglamentos implicados en la regulación del ruido en la edificación (DB HR y RD 1367), por lo que habrá cuestiones que se desarrollen con vinculación directa con el DB HR y se considerará su volcado a este documento. El apartado sobre ruido de instalaciones en el DB HR es el que tiene menor desarrollo y cuenta, por tanto, con un margen de mejora muy grande.

A continuación, se indican algunas de las propuestas que se están trabajando en el subgrupo “Contaminación acústica en la edificación”.

3.1. Coordinación en la redacción de ambos reglamentos

Son varios los temas de coordinación entre ambas reglamentaciones. Conviene revisar las referencias cruzadas entre el DB HR y el RD 1367/2007, ya que el cumplimiento del DB HR no implica el cumplimiento del RD 1367/2007 y viceversa.

También, existen definiciones específicas del ámbito de la edificación y en el contexto del DB HR que es conveniente coordinar; es el caso de los usos del edificio y tipo de recintos, del término “colindancia” y, muy importante, incluir la definición de “instalaciones del edificio”, para que su interpretación sea la adecuada y facilite sin ambigüedades la aplicación del RD.

Entendiendo que las instalaciones de los edificios abarcan un amplio conjunto de equipos y redes de conductos y tuberías que recorren todo el edificio y son heterogéneas, la propuesta es que se definan de manera específica en el RD, diferenciándolas de las actividades que es donde se interpreta que están incluidas a fecha de hoy. Asimismo, deben

definirse también sus condiciones de funcionamiento y ciclos de trabajo.

Otro tema a coordinar son los criterios en relación al “control de obra terminada” y que se distinga de una inspección de ruido de una actividad o una instalación de forma que se referencien en ambos reglamentos de forma coherente. El apartado 5.3 del DB HR establece los criterios bajo los cuales puede realizarse la comprobación del cumplimiento de las exigencias acústicas mediante mediciones in situ. Se indican criterios para los casos de aislamiento acústico y para el tiempo de reverberación. En este caso se propone, por tanto, que se incluya alguna referencia al RD 1367 en relación al control de los niveles de ruido procedente de las instalaciones en obra terminada, conforme a la metodología que se indique en éste.

3.2. Regulación del ruido de las instalaciones mediante valores límite

En la redacción del RD debe quedar clara la diferencia entre objetivo de calidad acústica y valor límite, y cuándo aplica uno u otro, en términos generales. En el caso concreto de las instalaciones de los edificios, se propone que éstas se regulen a través de los valores límite. De esta manera quedarían diferenciadas las situaciones en las que los recintos se vean afectados por la incidencia de ruido ambiental de focos de origen diverso, tanto externos como internos, frente a los focos de ruido concretos como puedan ser las instalaciones. Las instalaciones se evaluarían como emisores de ruido específicos y concretos del interior del edificio, con una transmisión de ruido fundamentalmente estructural, que deben cumplir con los valores límite de ruido transmitido a local colindante (actual tabla B2 del anexo III).

3.3. Procedimiento específico para la medición del ruido de instalaciones y criterios de cumplimiento

El anexo IV del RD 1367 establece los procedimientos de medición y evaluación para los índices de ruido para los niveles sonoros de los emisores acústicos. A lo largo de estos años de aplicación de este RD se han detectado diferentes cuestiones a modificar, pues el texto adolece de algunas imprecisiones técnicas, carencias o ambigüedades. Además, de esta revisión general, desde el punto de vista que nos ocupa de dotar al RD de un contenido adecuado para regular el ruido de las instalaciones, se propone que se desarrolle un procedimiento específico para ellas.

El procedimiento de medición establecido en el RD 1367 se aplica prácticamente de la misma manera a cualquier emisor relacionado con las infraestructuras portuarias, actividades o instalaciones, pero no contempla la especificidad de cada uno de los tipos de instalaciones y sus modos de funcionamiento. Hay instalaciones que funcionan de manera continua, otras funcionan de manera puntual, por eventos, de forma intermitente o conforme a unos ciclos de

trabajo determinados y, por tanto, su método de evaluación no puede ser genérico.

Además de la correcta definición de las instalaciones del edificio, ya comentada, resulta imprescindible la clasificación de las mismas atendiendo a sus características y condiciones de funcionamiento, pues en función de ellos serán los niveles de presión sonora que producen y transmiten y habrá que realizar los ensayos de manera adecuada y con unas instrucciones específicas para cada caso, así como con un índice de ruido determinado ($L_{A,max}$, $L_{A,eq,Ti}$, $L_{A,eq,ciclo}$, etc.)

Desde el punto de vista de su funcionamiento, existen instalaciones que funcionan largos periodos del día, en un régimen que pudiéramos considerar continuo, tales son las instalaciones de climatización o ventilación de viviendas. Sin embargo, hay otras instalaciones que funcionan de forma eventual y discontinua como la fontanería o los ascensores. Suele tratarse de instalaciones que tienen ciclos de funcionamiento que pueden considerarse estables, es decir, el ruido producido es similar en cada evento, pero no existe una pauta en cuanto al número de repeticiones de cada evento o su periodicidad, puesto que depende del uso que hagan de dichas instalaciones los ocupantes del edificio.

De esta manera, se pone de manifiesto la necesidad de definir unas instrucciones específicas en forma de procedimiento para la medición del ruido de los equipos técnicos y las instalaciones, conforme a su problemática y casuística diversa. Este procedimiento deberá ser compatible con el procedimiento de medición general que se defina en el RD para la evaluación en el ambiente interior de otros emisores de ruido. Esto implica definir modos de funcionamiento y ciclos de trabajo, tiempos de medición, indicadores a utilizar, etc.

Existen normas técnicas de referencia que pueden utilizarse como base para definir estos procedimientos de medida; además de la UNE-ISO 1996 [10,11] a aplicar en la metodología general, las normas UNE-EN ISO 16032 [12] y UNE-EN ISO 10052 [13] (referenciadas además en reglamentaciones de otros países europeos) son interesantes porque definen el procedimiento de medida en cuanto al muestreo espacial y temporal, los índices de ruido a utilizar, etc., además de especificar mediante un anexo, las condiciones de funcionamiento y los ciclos de trabajo, para los equipos técnicos más comunes de los edificios, a utilizar para realizar las mediciones de los niveles de ruido, tanto para la medida del nivel de presión sonora continuo equivalente (L_{eq}) como del nivel de presión sonora máximo (L_{max}).

A nivel europeo países como Francia, Italia, Suecia, Alemania e Inglaterra, referencian ambas normas ISO 10052 o ISO 16032 para la realización de los ensayos de los niveles de ruido de las instalaciones. Estos países en ocasiones mencionan estas normas directamente en sus respectivos reglamentos de edificación y en otras publican guías para dar indicaciones sobre cómo realizar los ensayos de los niveles de ruido de los equipos y de las instalaciones mediante estas normas [14,15].

Otras propuestas de las que se está participando a través de otro subgrupo de trabajo (“Indicadores acústicos y evaluación de los mismos”) son el uso de índices corregidos por el tiempo de reverberación del recinto o la de la inclusión de un índice de ruido basado en valores máximos para el ruido de aquellas instalaciones con funcionamiento intermitente, discontinuo o por eventos o aquellas con arranques o cambios significativos en el modo de trabajo con picos en el nivel de presión sonora. La regulación de valores límite máximos ya está presente en algunos decretos autonómicos como es el caso del País Vasco [16].

En relación al cumplimiento de los requisitos deberían indicarse unas condiciones de cumplimiento de los valores límite de inmisión de ruido específicas para las instalaciones de los edificios, como ya se hace en el artículo 25 para las infraestructuras viarias, ferroviarias y aeroportuarias y para las infraestructuras portuarias y actividades; y definirse unos criterios en base al diferente funcionamiento de las instalaciones en función del tipo que sean y su modo de funcionamiento (continuo o discontinuo, de ruido estacionario, por eventos, etc.)

Por último, en relación a la comparativa de los niveles de ruido con diferentes valores de exigencia en función del período día, tarde o noche, ningún país europeo regula el ruido de las instalaciones de esta manera, sino que la mayoría de ellos establecen un nivel límite único (ya sea en términos de $L_{A,eq,T}$, de $L_{A,max}$ o incluso ambos); por lo que podría ser pertinente valorarlo de esta manera también en nuestra normativa.

4. CONCLUSIONES

El RD 1367/2007 supuso en su momento un gran avance en materia de evaluación del ruido ambiental estableciendo unos criterios comunes. Tras más de 15 años de vigencia y aplicación de esta normativa se han detectado aspectos que conviene revisar y modificar. Por ello, desde el MITERD se ha puesto en marcha el proceso de revisión del RD 1367 y se ha creado una estructura de trabajo y un espacio colaborativo donde los diferentes grupos de trabajo y participantes pueden compartir información y avanzar en los trabajos.

Se trata de un trabajo importante y de máximo interés pues tenemos ahora la oportunidad de mejorar nuestra regulación básica en materia de ruido, en el sentido de hacerla más eficiente y útil, sin reducir la protección de la salud de las personas y de la calidad acústica del medio.

Aprovechando sinergias, la relación y repercusiones de la revisión de esta regulación fundamentalmente medioambiental con la reglamentación en materia de acústica de la edificación (DB HR del CTE), y la imprescindible coordinación necesaria entre ambos reglamentos, desde el subgrupo de trabajo de “Contaminación acústica en la edificación” (MITMA-IETcc) se están realizando varias propuestas.

Uno de los temas que consideramos prioritarios es el tratamiento del ruido de las instalaciones dentro del RD; éste es un tema que no está recogido con suficiente profundidad y que tiene su repercusión en el DB HR Protección frente al ruido, por lo que debe tratarse de manera específica en una futura reglamentación de RD 1367 revisado; incluso habrá nuevos contenidos resultantes de este trabajo de revisión que sean volcados en el DB HR en mejora del apartado actual del ruido de instalaciones.

Para aplicar el RD actual a las instalaciones de los edificios es necesario realizar ciertas interpretaciones y adaptar su metodología a las características de funcionamiento y ciclos de trabajo de los equipos, especialmente en el caso de aquellas instalaciones o equipos con funcionamiento intermitente o niveles de ruido fluctuantes.

El nivel de presión acústica en un recinto debido a equipos depende del nivel de potencia acústica del equipo, de su instalación, del montaje de los conductos o tuberías y la situación de los recintos protegidos respecto de los focos emisores. Las formas de abordar el ruido de instalaciones son muy variadas en función del tipo de los equipos o instalaciones y de la afección a los recintos de los edificios. Por todo ello, el ruido de las instalaciones del edificio debe tener suficiente entidad en la nueva redacción de este RD como para que, a lo largo de su articulado, tal y como se considere, queden adecuadamente reflejadas sus particularidades, definiciones, clasificación, criterios de aplicación, metodología de ensayo y de evaluación específicas, criterios de cumplimiento, etc.

5. REFERENCIAS

- [1] WHO. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European Region. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region>
- [2] EEA. (2020). Environmental noise in Europe-2020. In European Environment Agency (Issue 22/2019). <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>.
- [3] Jefatura del Estado, Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. (BOE 18/11/2003), vol. 276. 2003, pp. 40494 a 40505. <https://www.boe.es/eli/es/l/2003/11/17/37>
- [4] Ministerio de la Presidencia, RD 1367/2007 de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. (BOE 23/10/2007), vol. 254. 2007, pp. 42952–42973. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/10/19/1367>
- [5] Ministerio de Fomento, Documento Básico DB HR Protección frente al Ruido. Código Técnico de la Edificación. 2019.
- [6] A. Romero, B. Casla, T. Carrascal, A. Canella, “Caso de estudio: Ruido de ascensores en edificación existente”, in Proc. of Tecniacústica 2014 (Murcia, Spain) pp 756-769, 2014.
- [7] T. Carrascal, A. Romero and B. Casla, “Aplicación del RD 1367/2007 a las instalaciones de los edificios. Casos de estudio”, in Proc. of Tecniacústica 2020, (on line), pp 50-61, 2020.
- [8] T. Carrascal, A. Romero and B. Casla, “Applying Spanish acoustic regulations to mechanical ventilation with heat recovery systems. Case study”, in Proc. of Internoise22, (Glasgow, Scotland), pp. 2271-2280, 2022.
- [9] T. Carrascal, A. Romero, B. Casla, “Ruido de sistemas de extracción de humos de garaje en 3 edificios de viviendas”, in Proc. of Tecniacustica 2022, (Elche, Spain), pp. 441-449, 2022.
- [10] UNE-ISO 1996-1:2020. Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación (ISO 1996-1:2016)
- [11] UNE-ISO 1996-2:2020. Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de presión Sonora (ISO 1996-2:2017)
- [12] UNE-EN ISO 16032: 2005. Acústica. Medición del nivel de presión sonora de los equipos técnicos en los edificios. Método de peritaje (ISO 16032:2004).
- [13] UNE-EN ISO 10052: 2022. Acústica. Mediciones in situ del aislamiento a ruido aéreo, ruido de impactos y ruido de equipos técnicos. Método de control. (ISO 10052: 2021)
- [14] “Guide de Mesures Acoustiques (Acoustic Measurement Guide)”. France: Ministère de l’Ecologie, du Développement durable et de l’Energie. Ministère du Logement et de l’Égalité des Territoires, 2014. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20de%20mesures%20acoustiques%20-%20ao%20C3%BBt%202014.pdf>
- [15] “ANC Guidelines. Measurement of Sound levels in Buildings”. Version 1.0. June 2020. <https://www.association-of-noise-consultants.co.uk/wp-content/uploads/2019/12/ANC-Measurement-of-Sound-Levels-in-Buildings-v1.0-June-2020.pdf>
- [16] Gobierno Vasco, Decreto 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica de la Comunidad Autónoma del País Vasco, vol. BOPV 222. 2012, p. 2012/5056 (1-46).

DISFUNCIONES EN LA PENALIZACIÓN POR TONALIDAD EN EL RD 1367/2007

Miguel Arana Burgui^{1*}
Rubén Eguinoa Cabrito¹
Ana Valencia Leoz¹
Ricardo San Martín Murugarren¹

¹Depto. de Ciencias. Instituto INAMAT2. Universidad Pública de Navarra

RESUMEN

El RD 1367/2007 penaliza los niveles sonoros por la existencia de componentes tonales. La penalización puede ser de hasta 6 dB dependiendo de dos factores. En la redacción actual, dos ruidos indistinguibles pueden diferir (su penalización) en hasta 6 dB. Por otra parte, el criterio seguido por el RD se basa, exclusivamente, en el análisis en bandas de tercio de octava. Esto no tiene relación con las normativas (UNE-EN 61400-11, por ejemplo) que regulan la tonalidad y su correspondiente audibilidad. En el presente trabajo se ejemplifican las graves disfunciones a que da lugar la redacción actual. También se lleva a cabo un estudio comparativo y de correlación entre la audibilidad tonal y la penalización contemplada en el RD, a fin de analizar la coherencia entre audibilidad de los tonos y su correspondiente penalización.

ABSTRACT

RD 1367/2007 penalizes sound levels for the existence of tonal components. The penalty can be up to 6 dB depending on two factors. In the current wording, for two indistinguishable noises, their penalty can differ by up to 6 dB. On the other hand, the criterion followed by the RD is based, exclusively, on the analysis in one-third octave bands. This has no relation with the standards (UNE-EN 61400-11, for example) that regulate tonality and its corresponding audibility. This paper exemplifies the serious dysfunctions to which the current wording gives rise. A comparative and correlation study is also carried out between tone audibility and the penalty covered in the RD, in order to analyze the coherence between tone audibility and its corresponding penalty.

Palabras Clave— Tonalidad, RD 1367/2007, Audibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El apartado 2 del Anexo I del RD 1367/2007 [1] define el *Nivel de ruido continuo equivalente*, $L_{Aeq,T}$ como el índice básico para la valoración y evaluación del ruido. No obstante, en el punto c) del mismo apartado introduce correcciones al mismo, definiendo el *Índice de ruido continuo equivalente corregido* $L_{K_{eq},T}$. El índice de ruido $L_{K_{eq},T}$, es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, ($L_{Aeq,T}$), corregido por la presencia de componentes tonales emergentes, componentes de baja frecuencia y ruido de carácter impulsivo, de conformidad con la expresión siguiente:

$$L_{K_{eq},T} = L_{Aeq,T} + K_t + K_f + K_i \quad (1)$$

donde:

– K_t es el parámetro de corrección asociado al índice $L_{K_{eq},T}$ para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes tonales emergentes.

– K_f es el parámetro de corrección asociado al índice $L_{K_{eq},T}$, para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes de baja frecuencia.

– K_i es el parámetro de corrección asociado al índice $L_{K_{eq},T}$, para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de ruido de carácter impulsivo.

calculados, todos ellos, por aplicación de la metodología descrita en el anexo IV. El proceso para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes tonales emergentes es el siguiente:

- Se realiza el análisis espectral del ruido en 1/3 de octava, sin filtro de ponderación.
- Se calcula la diferencia:

$$L_t = L_f - L_s \quad (2)$$

donde:

L_f es el nivel de presión sonora de la banda f , que contiene el posible tono emergente.

* **Autor de contacto:** marana@unavarra.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

L_s es la media aritmética de los dos niveles siguientes, el de la banda situada inmediatamente por encima de f y el de la banda situada inmediatamente por debajo de f .

c) Se determina la presencia o la ausencia de componentes tonales y el valor del parámetro de corrección K_t aplicando la tabla siguiente (Tabla 1):

Tabla 1. Corrección por la presencia de componentes tonales

Banda de frecuencia 1/3 de octava	L_t en dB	Componente tonal K_t en dB
De 20 a 125 Hz	Si $L_t < 8$	0
	Si $8 \leq L_t \leq 12$	3
	Si $L_t > 12$	6
De 160 a 400 Hz	Si $L_t < 5$	0
	Si $5 \leq L_t \leq 8$	3
	Si $L_t > 8$	6
De 500 a 10.000 Hz	Si $L_t < 3$	0
	Si $3 \leq L_t \leq 5$	3
	Si $L_t > 5$	6

d) En el supuesto de la presencia de más de una componente tonal emergente se adopta como valor del parámetro K_t , el mayor de los correspondientes a cada una de ellas.

La razón de introducir penalizaciones está motivada por estudios que han mostrado que ruidos con idéntico nivel L_{Aeq} inducen diferente molestia por características específicas del ruido. Así, por ejemplo, los ruidos intensos de baja frecuencia parecen producir síntomas claros, como trastornos respiratorios y dolor auditivo. Se ha observado que los juicios de sonoridad y las reacciones de molestia son mayores con los ruidos de baja frecuencia que con otros ruidos para un mismo nivel de presión sonora. Aunque los efectos de intensidades más bajas de ruido de baja frecuencia son difíciles de establecer por razones metodológicas, las pruebas sugieren que una serie de efectos adversos del ruido en general se derivan de la exposición al ruido de baja frecuencia [2]. Cabe decir, no obstante que las molestias parecen depender del nivel sonoro y que hay también trabajos en los que no se encontraron efectos asociados a la pérdida de audición con la exposición a ruidos de baja frecuencia [3]. La cuantificación de esta penalización requiere, simplemente, la medida con los filtros A y C.

Respecto a la penalización por la característica impulsiva, la cuantificación de esta penalización es muy simple; Se mide, preferiblemente de forma simultánea, los niveles de presión sonora continuo equivalente con ponderación frecuencial A, L_{Aeq} , así como el mismo índice, pero con ponderación temporal impulso I, L_{AIeq} . Se cuantifica la penalización en función de la diferencia entre ambos. Se sigue manteniendo el uso de la ponderación temporal impulso, aunque su introducción estuvo motivada para que los sonómetros analógicos pudieran mostrar de forma aproximada, el nivel del impulso (de duración muy breve) al

usuario. En realidad, se penalizan como impulsivos sonidos- ruidos que, razonablemente, no lo son; por ejemplo, la voz humana. Un análisis crítico de esta penalización puede verse en [4]. En el presente trabajo, discutiremos la penalización por componentes tonales.

2. TONALIDAD DE UN RUIDO. MEDIDA, EVALUACIÓN Y MOLESTIA.

Ruido tonal es un ruido caracterizado por la presencia de componentes de una determinada frecuencia o banda estrecha que son distinguibles respecto del sonido global, cuya percepción conlleva un aumento de la molestia asociada (RAE). Es obvio que esta definición es cualitativa. Un problema a la hora de ‘cuantificar’ tal definición es que los requisitos para que un sonido-ruido posea tonalidad los define la norma concreta que se utilice. Por ejemplo, el ancho de banda que se utilice (octavas, tercios, doceavos, banda crítica) depende del criterio que establezca la norma. La ‘distinguibilidad’ puede requerir un incremento del nivel (respecto a bandas contiguas) diferente. Una norma puede concluir que un tono es audible y otra norma puede concluir que no.

Las normas que se basan en estudios fisiocústicos y sicoacústicos bien contrastados son, evidentemente, preferibles. Así, por ejemplo, las normas UNE ISO 1996-2 [5] (junto con el documento ISO/PAS 20065 [6] para determinar la audibilidad de los tonos) y UNE-EN 61400-11 [7], definen con gran precisión los siguientes aspectos:

- a) Identificación de máximos locales (posibles tonos).
- b) Ancho de banda del análisis (típicamente, 2 Hz).
- c) Establecimiento del ancho de banda crítica.
- d) Cálculo del nivel medio del ruido enmascarado
- e) Determinación del nivel de tono.
- f) Cálculo de la tonalidad y audibilidad tonal.

En su anexo J, La norma UNE ISO 1996-2 propone el ajuste tonal siguiente a partir de la audibilidad media (Tabla 2).

Tabla 2. Ajuste tonal en función de la audibilidad media

Audibilidad media ΔL en dB	Ajuste tonal K_t en dB
$\Delta L \leq 0$	0
$0 < \Delta L \leq 2$	1
$2 < \Delta L \leq 4$	2
$4 < \Delta L \leq 6$	3
$6 < \Delta L \leq 9$	4
$9 < \Delta L \leq 12$	5
$12 < \Delta L$	6

Debido a la precisión de la evaluación subjetiva del ruido, la misma norma propone simplificar el ajuste tonal a solo dos valores: $K_t = 3$ dB para $2 \text{ dB} < \Delta L \leq 9 \text{ dB}$ y $K_t = 6$ dB para $\Delta L > 9 \text{ dB}$. Por supuesto, $K_t = 0$ dB para $\Delta L \leq 2 \text{ dB}$. Esta simplificación es la que adoptan tanto el RD 1367/2007 como

decretos autonómicos (a comentar posteriormente) y legislaciones análogas de países europeos.

Finalmente, en su anexo K (método de inspección), la norma UNE ISO 1996-2 propone una nueva simplificación. Para determinar la presencia de un tono, se compara el nivel de presión sonora en una banda de tercio de octava con los niveles de las bandas adyacentes. Para que se identifique como tono, su nivel debe exceder al de las adyacentes en una diferencia de nivel constante. Es importante dejar constancia de que la norma no dice que la comparación sea con el promedio de niveles de las bandas adyacentes. Posteriormente veremos cómo este añadido en el RD lleva a disfunciones claras. Las diferencias de nivel constante pueden variar con la frecuencia. Las posibles opciones que plantea son las adoptadas por el RD, es decir, 15 dB en las bandas de tercio de octava de baja frecuencia (25 a 125 Hz), 8 dB en las bandas de frecuencia media (160 a 400 Hz) y 5 dB en las bandas de alta frecuencia (500 Hz a 10 kHz). Como resumen de este apartado podemos decir lo siguiente. Las normas bien fundamentadas y contrastadas ([5], [7]) definen y evalúan con precisión el carácter tonal de un ruido en función de su audibilidad. Dada la relativa complejidad del proceso, proponen algunas simplificaciones. Tanto el RD como los decretos autonómicos adoptan tales simplificaciones en aras a la practicidad de las evaluaciones acústicas.

3. ASPECTOS PROBLEMÁTICOS EN LA PENALIZACIÓN POR TONALIDAD EN EL RD 1367/2007

3.1. Comparativa con bandas adyacentes.

Un primer aspecto que resulta muy problemático (más bien, totalmente ilógico) es la penalización de sonidos sin, ciertamente, componente tonal. No existe ninguna frase en el RD en donde se defina qué es una componente tonal. Importa la comparación entre una banda y el promedio de sus limítrofes. Pondremos un ejemplo muy claro de esta posible disfunción. Lo haremos con sonidos recogidos de bases de datos públicas [8]. Se ha tomado un ruido de fondo (principalmente, tráfico) de duración 13 s. Se ha tomado un registro sonoro (13 s) de una aspiradora (Asp). Tal sonido se ha ecualizado incrementado en 7 dB su nivel en la banda de 6,3 kHz (Asp Eq). La figura 1 muestra las señales temporales de los tres ruidos. La figura 2 muestra el análisis espectral de los tres ruidos en bandas de tercio de octava. Debe notarse que, al ser los tres sonidos recogidos de una base de datos, los niveles medidos para los dos aspiradores no incluyen el ruido de tráfico. En la medida real, los niveles medidos para ambos aspiradores, incluirían el ruido de fondo. Observando la potencia espectral del RF, no cambiaría en nada los análisis y conclusiones que siguen, ni en el nivel global en dB o dBA, ni existencia de componentes tonales debidas al RF.

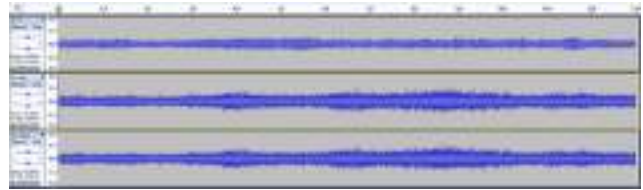


Figura 1. Señales temporales. Ruido de fondo (RF), aspirador (Asp) y aspirador ecualizado (AspEq).

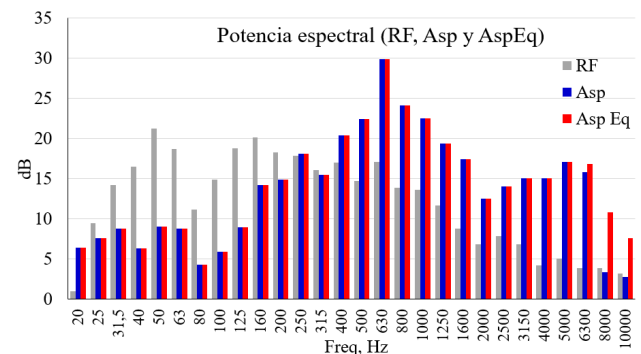


Figura 2. Análisis espectral de los tres ruidos en bandas de tercio de octava.

Los niveles en banda ancha para los dos aspiradores (sin ponderación y con ponderación A) son idénticos, 33,5 dB y 31,9 dBA. El RD ‘detecta’ un tono puro emergente en la banda de tercio de 630 Hz, penalizando el índice $L_{K,eq}$ en 6 dBA; A la vista de la gráfica de la potencia espectral, ello resulta bastante razonable y acorde tanto con la norma UNE_ISO 1996-2 [5] como con la con UNE-EN 61400-11 [7]. No obstante, también ‘detecta’ un tono puro emergente en la banda de tercio de 6,3 kHz. Si no existiera el tono en 630 Hz, el índice $L_{K,eq}$ se vería penalizado en 6 dBA, debido a este ‘tono’ en 6,3 kHz. Sin embargo, observando el espectro (barras azules) no se intuye ningún tono emergente. Todavía más, ni siquiera el nivel en la banda de 6,3 kHz es superior al de la banda de 5 kHz. La razón es que el promedio de las bandas contiguas (5 y 8 kHz) es inferior en más de 5 dB al nivel de la banda de 6,3 kHz. Si el aspirador tuviera un nivel 7 dB más en la banda de 8 kHz (barras rojas) la penalización por tonalidad sería nula.

Una primera premisa razonable sería la de exigir que la posible componente tonal posea nivel superior a las bandas contiguas. Esto se exige tanto en [5] como en [7], en el sentido de que el posible tono tenga un máximo local en el espectro. En nuestro caso, sería necesario añadir (al menos) que la posible componente tonal supere, en nivel, al de las bandas contiguas. Así, por ejemplo, lo especifica el Decreto 213_2012 del Gobierno Vasco [9] requiriendo que el tono sea emergente de tal forma que destaque con respecto a las bandas inmediatamente anterior y posterior. Adicionalmente (lo cual complica la evaluación) también requiere que el tono sea audible según el umbral auditivo humano, en campo libre,

referenciado en la norma ISO 226:2003 [10]. También admite que, en el caso de que sea necesario, se pueden efectuar análisis en banda más estrecha que los 1/3 de octava cuando sea oportuno y siempre bajo normas internacionalmente reconocidas para su evaluación. En definitiva, este Decreto corrige la exigencia de máximo local y el requerimiento de audibilidad del tono, admitiendo análisis más detallados sobre la tonalidad.

El Decreto 176_2009 [11] de la Generalitat de Catalunya es similar al RD, con dos particularidades. Por una parte, también requiere que el tono sea audible según el umbral auditivo humano, en campo libre, especificando en una tabla el valor mínimo audible (Tf) para todas las bandas de tercio entre 20 Hz y 20 kHz. Por otra parte, como aspecto diferenciador, para determinar el valor de Lt, tanto Lf (nivel sonoro de la banda que contiene el tono emergente) como Ls (media aritmética de los niveles de las bandas inferior y superior) son el resultado de la media energética de tres mediciones consideradas válidas. Esto no se considera así ni en el RD ni en el Decreto vasco. Puede darse el caso de que alguna de tales medidas no cumpla los criterios de existencia de tono emergente y el promedio de ellas sí y viceversa.

Los rangos para la penalización en las distintas zonas de frecuencias son idénticos en el RD y en el Decreto 213_2012 del Gobierno Vasco. Por el contrario, en el caso del Decreto 176_2009 de la Generalitat de Catalunya, para la penalización de 6 dB en la zona de bajas frecuencias (20 a 125 Hz), se requiere que el valor de Lt sea superior a 15 dB, en vez de los 12 dB que requieren los dos primeros. En este aspecto, coincide con [5]. Otra referencia normativa es el Decreto 266/2004 de la Generalitat Valenciana [12]. En este caso, el tratamiento de la tonalidad es bastante más sencillo. Solo considera los rangos superiores del valor Lt, penalizando en una cantidad fija (5 dB) cuando dicho valor supera los 15, 8 y 5 dB en las zonas de 20-125 Hz, 160-400 Hz y 500-10.000 Hz, respectivamente.

3.1. Tonalidad en la frontera de bandas.

Otra disfunción del RD se produce cuando ‘la causa’ de la tonalidad se ubica en una zona de frecuencias entre dos bandas de tercio de octava, de tal forma que el nivel sonoro de las dos bandas que comparten tal componente se ‘reparten’ la energía entre ambas. Si tal componente se desplaza ligeramente a izquierda o derecha, pasa a contribuir bien a una o a otra banda. Aunque la sensación sonora pueda ser *exactamente* igual en cuanto a la percepción de la tonalidad (en base a normas más específicas, [5] [7]), la diferencia de penalización puede ser fácilmente de 3 dB (incluso de 6 dB). Lo mostraremos (descriptiva y auditivamente) con un ejemplo.

Se ha medido un ruido con componente tonal en torno a la frecuencia de 630 Hz. Su potencia espectral se muestra en la figura 3 (barras azules). Hemos desplazado la componente tonal ligeramente hacia la derecha; aproximadamente, un

tono musical, hasta 707 Hz. La potencia espectral de este segundo ruido se muestra también en la figura 3 (barras rojas). Los niveles de ambos ruidos son, esencialmente, idénticos, 43,2 y 43,1 dB (40,9 y 41,0 dBA). Sin embargo, aplicando la penalización por tonalidad del RD, el primer ruido se penaliza con 6 dB y el segundo no se penaliza. Por tanto, los niveles $L_{K,eq}$ de tales ruidos son, finalmente, 46,9 y 41,0 dBA, lo cual supone una gran diferencia. La gráfica resulta bastante ‘engañosa’; El espectro del primer ruido muestra una ‘clara’ tonalidad, cuando el segundo no parece tonal (o, de otra forma, parece ‘bitonal’). Sin embargo, la tonalidad de ambos ruidos ([6], [7]) es, esencialmente, idéntica. Bajo análisis de bandas críticas, la tonalidad sería prácticamente idéntica, como se muestra en la figura 4, donde se ha realizado análisis de tonalidad en base a la banda crítica (diferente para las dos frecuencias) según la norma [7]. Esta diferente percepción es realmente algo artificial, producto de llevar a cabo el análisis en bandas de tercio de octava.

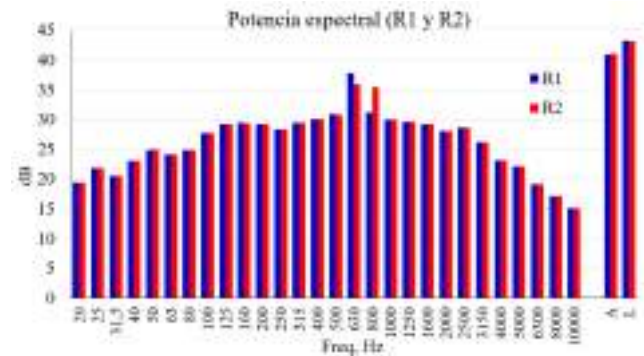


Figura 3. Análisis espectral de dos ruidos con componente tonal ligeramente desplazada

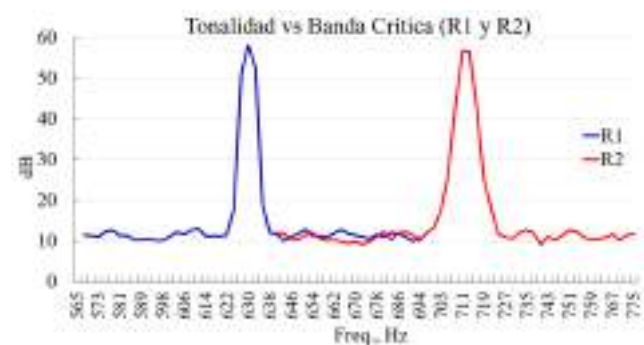


Figura 4. Tonalidad vs banda crítica, según UNE-EN 61400-11.

4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Las Normas que describen con mayor precisión la medida y evaluación de la tonalidad ([5] [7]) requieren de un análisis de banda estrecha para calcular (dentro de una banda crítica) los niveles de tono y de ruido enmascarado para, finalmente, determinar la penalización en función de la audibilidad de los

tonos. De esta forma ([5], Anexo J, método de ingeniería) se cuantifica la penalización (ajuste tonal K_t) en pasos de 1 dB, desde 0 dB hasta 6 dB, para diferentes rangos de audibilidad, de 0 dB en adelante. Debido a la precisión de la evaluación subjetiva del ruido, el mismo Anexo sugiere simplificar el ajuste tonal a solo dos valores, 3 y 6 dB, para audibilidades entre 2 y 9 dB, o superiores a 9 dB, respectivamente. En todo este proceso, insistimos, el análisis espectral ha de ser en banda estrecha, básicamente, con anchura de 2 Hz.

La misma norma ([3], Anexo K, método de inspección) admite que para determinar la presencia de un componente espectral de frecuencia discreta prominente (tono) se puede comparar el nivel en una banda de tercio de octava con los niveles de las bandas adyacentes. Se exige que el nivel de la banda 'tonal' exceda al nivel (promediado) de las contiguas. La percepción de la tonalidad cambia con la frecuencia. Las opciones que aporta el Anexo son: 15 dB en las bandas de tercio de octava de baja frecuencia (25 a 125 Hz), 8 dB en las bandas de frecuencia media (160 a 400 Hz) y 5 dB en las bandas de alta frecuencia (500 a 10.000 Hz).

Tanto el RD 1367/2007 como los decretos autonómicos comentados ([5] [7]) se basan en estos dos Anexos para fijar únicamente dos posibles penalizaciones por tonalidad (3 ó 6 dB) según la diferencia L_t y según la zona de frecuencias. En el Decreto [8] la penalización es única, 5 dB, cuando se supere un valor dado de L_t . Esta forma de penalización es la simplificada que adopta el Anexo K (método de inspección) de la norma UNE-ISO 1996-2 [3].

Trabajos previos han analizado la correlación entre la tonalidad y su penalización correspondiente en base al RD 1367/2007 [13], proponiendo una penalización más coherente (y perfectamente correlacionada con la audibilidad) para las componentes tonales emergentes a aplicar en dicho RD, la cual mantiene los rangos de penalización mínimos y máximos, pero evitando los saltos bruscos de la misma. Asimismo, solo se lleva a cabo penalización cuando la tonalidad supera los 5 dB. Recuperamos tal propuesta en la tabla 3

Tabla 3. Propuesta de corrección por la presencia de componentes tonales. La penalización se redondearía al valor del entero más próximo.

Banda de 1/3 de octava, Hz	L_t en dB	Penalización K_t en dB
De 20 a 125	Si $L_t < 6$	0
	Si $6 \leq L_t \leq 12$	$L_t - 6$
	Si $L_t > 12$	6
De 160 a 400	Si $L_t < 2$	0
	Si $2 \leq L_t \leq 9$	$(6/7)*L_t - (12/7)$
	Si $L_t > 9$	6
De 500 a 10.000	Si $L_t < 2$	0
	Si $3 \leq L_t \leq 6$	$1,5*L_t - 3$
	Si $L_t > 6$	6

La figura 5 muestra en forma gráfica de penalización (versus tonalidad-audibilidad) para los tres rangos de frecuencia: 20-125 Hz, 160-400 Hz y 500-10000 Hz, si bien ejemplificados en las bandas de tercio de octava de 80 Hz, 250 Hz y 4 kHz.

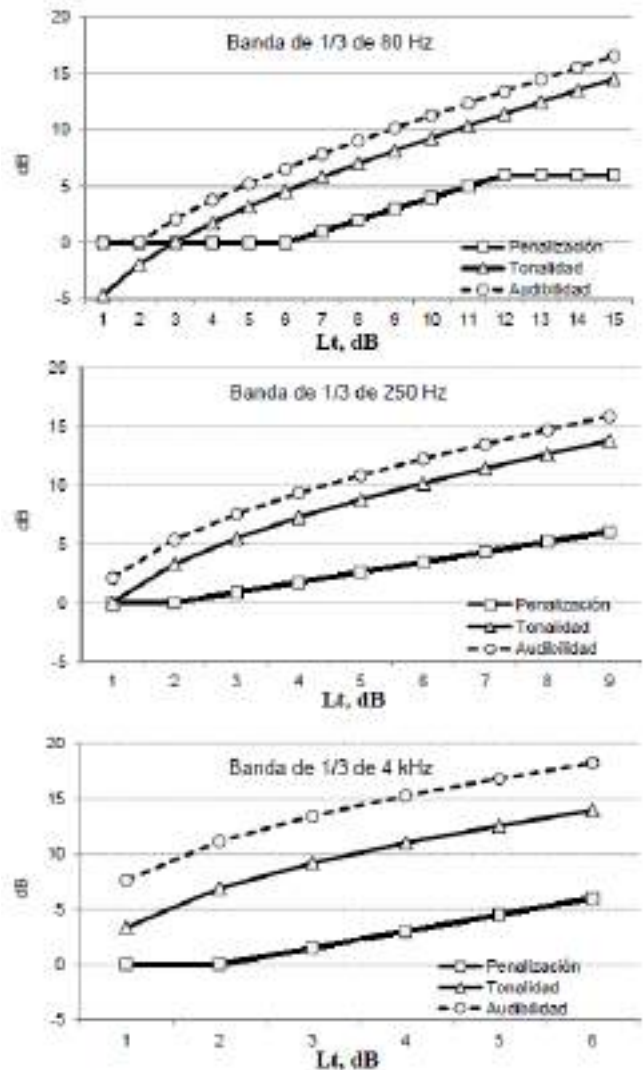


Figura 5. Tonalidad, audibilidad y propuesta de penalización para los tres rangos de frecuencia: 20 – 125 Hz, 160 – 400 Hz y 500 – 10.000 Hz, ejemplificados en 80 Hz, 250 Hz y 4 kHz.

Las grandes capacidades de los equipos digitales actuales y la relativa facilidad para el uso de programas y aplicaciones que se pueden implementar [14] tanto por los fabricantes como por los usuarios, permiten la evaluación rigurosa de los niveles sonoros, incluidos los términos correctores. La simplificación de la medida (en ocasiones, injustificada) puede llevar a notables disfunciones.

6. CONCLUSIONES

En nuestra opinión, se producen disfunciones en el RD 1367/2007 en lo relativo a la tonalidad, tal como hemos intentado mostrar en el presente trabajo. Estimamos conveniente corregir/modificar/añadir (al menos) algunos aspectos para conseguir adecuar la penalización por tonalidad a la percepción humana.

1. Debiera exigirse que la posible componente tonal supere, en nivel, al de las bandas contiguas; es decir, que se trate de un máximo local en el análisis espectral, bien sea este en tercios, doceavas o en bandas críticas. Si el análisis lo fuera en tercios de octava, sería razonable exigir que la banda con posible tono superara en 3 dB el nivel de las adyacentes y el tono fuera audible según el umbral auditivo humano.

2. La evaluación de la tonalidad, basada en el análisis en bandas de tercio de octava lleva a minusvaloraciones de la misma cuando la/s componente/s tonal/es se encuentran en la frontera de dos bandas. Las gráficas espectrales del análisis en tercios de octava pueden resultar muy engañosas, no mostrando tonalidad cuando tal tonalidad es evidente. En caso de detectarse ‘tonalidad’ en dos bandas contiguas (1/3 de octava) se debiera exigir análisis en bandas críticas.

3. Las diferencias en los niveles finales, debidas a las dos consideraciones anteriores, pueden llevar a ‘errores’ (diferencias) de 6 dB en la valoración del ruido.

4. Se propone una penalización más coherente (y perfectamente correlacionada con la audibilidad) para las componentes tonales emergentes a aplicar en el RD, la cual mantiene los rangos de penalización mínimos y máximos, pero evitando los saltos bruscos de la misma

5. La simplificación que usa el RD 1367/2007 para la penalización por tonalidad y que lleva a posibles disfunciones, no está justificada (en nuestra opinión) dadas las grandes capacidades de los equipos digitales actuales y la relativa facilidad para el uso de programas y aplicaciones que se pueden implementar en el análisis de las medidas.

Con tales equipos y herramientas, pueden aplicarse (de forma relativamente fácil) normas internacionalmente reconocidas para la evaluación de la tonalidad.

12. REFERENCIAS

- [1] RD1367/2007. BOE núm. 254, de 23 de octubre de 2007. Ref. BOE-A-2007-18397, 2007.
- [2] Berglund B, Hassmén P, Job RF. Sources and effects of low-frequency noise. *J Acoust Soc Am*. 1996 May;99(5):2985-3002. doi: 10.1121/1.414863. PMID: 8642114, 1996.
- [3] Zhou, G.; Fu, W. Total serum bilirubin levels and sensorineural hearing loss in the US adolescents: NHANES 2007–2010. *Int. J. Pediatric Otorhinolaryngol*. 105, 20–26, 2018.

[4] Barti Domingo, Robert. Incorrecciones en la evaluación de componentes impulsivas, baja frecuencia y ruido de fondo. 53º Congreso Nacional de Acústica, TecniAcústica 2022. Elche, 2022.

[5] UNE-ISO 1996-2. Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: determinación de los niveles de presión sonora, 2020.

[6] ISO/PAS 20065. Acoustics. Objective method for assessing the audibility of tones in noise. *Engineering method*, 2016.

[7] UNE-EN 61400-11. Aerogeneradores. Técnicas de medida del ruido acústico, 2004.

[8] Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (Intef). Ministerio de Educación y Formación Profesional. Acceso: mayo de 2023. <https://procomun.intef.es>

[9] DECRETO 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica de la Comunidad Autónoma del País Vasco. BOPV nº 222, 2012.

[10] ISO 226:2003. Acoustics - Normal equal-loudness-level contours, 2003

[11] DECRETO 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica, y se adaptan sus anexos. *Diario Oficial de Cataluña* nº 5506, 2009.

[12] DECRETO 266/2004, Conselleria de Territorio y Vivienda de la Generalitat Valenciana, *por el que se establecen normas de prevención y corrección de la contaminación acústica en relación con actividades, instalaciones, edificaciones, obras y servicios*. DOGV nº 4.901, 2004.

[13] Machín, J.; Arregui, A.; San Martín, R.; Arana, M., Análisis de la penalización por tonalidad en el RD 1367/2007 y su relación con la audibilidad tonal, VIII Congreso Iberoamericano de Acústica, acústica 2012. Évora, Portugal, 2012.

[14] Arana, Miguel; San Martín, Ricardo; Ezcurra, Amaya; Valencia, Ana; Llorente, Elena, An Efficient Algorithm for the Evaluation of Tonality and the Determination of the Tonal Frequency According to IEC 61400-11, *InterNoise 2019*. Madrid Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings: *InterNoise19*, 16-19 June, Madrid, pp. 2017-2024, 2019

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía e Innovación la ayuda concedida por el Proyecto BIA2016-76957-C3-2-R, en el marco del cual se comenzó este trabajo



EVALUACIÓN Y LÍMITES DE RUIDO PARA ACTIVIDADES INDUSTRIALES FUERA DEL CASCO URBANO

Rocío Perera Martín^{1*}
Teresa Rodríguez Sánchez¹

¹Ingeniería y Servicios en Acústica, Iberacústica, S. L.

RESUMEN

Las exigencias que deben cumplir las grandes instalaciones industriales situadas fuera de los cascos urbanos, reguladas tanto por la normativa estatal y autonómica, como en especial, por su correspondiente Autorización Ambiental Integrada (AAI), derivan en algunos casos en incumplimientos normativos que en realidad no están generando ninguna molestia o afección acústica.

El objeto de esta comunicación es poner de manifiesto esta circunstancia, de cara a la futura revisión de la normativa de referencia (Real Decreto 1367/2007), y poder establecer en el nuevo texto unas exigencias razonables que garanticen la protección a los posibles receptores sensibles del entorno.

ABSTRACT

The requirements to be met by large industrial facilities located outside urban areas, regulated by state and regional regulations as in particular in their respective Integrated Environmental Authorization, in some cases result in regulatory non-compliances that are not actually generating any disturbance or acoustic impact.

The aim of this communication is to highlight this circumstance, with a view to the future revision of the reference regulation (Royal Decree-Law 1367/2007), and to be able to establish in the new document reasonable requirements that guarantee the protection of possible sensitive receptors in the environment.

Palabras Clave— *Ruido industrial, normativa acústica, impacto acústico.*

1. INTRODUCCIÓN

La normativa nacional de referencia para la evaluación del impacto acústico de actividades, el Real Decreto 1367/2007, está en proceso de revisión y modificación, con la finalidad de incorporar los nuevos conocimientos y mejoras técnicas de los últimos años.

Los técnicos que realizamos mediciones acústicas, y que hemos tenido que interpretar los procedimientos y exigencias de la norma, nos hemos encontrado con aspectos ambiguos, o situaciones en las que los resultados de su aplicación nos han llevado a declaraciones que nos han parecido poco sensatas.

En esta comunicación queremos presentar dos de ellas, relacionadas con las afecciones que generan las actividades industriales.

La primera se refiere a las exigencias que se suelen aplicar a actividades industriales fuera de los cascos urbanos, en terreno no urbanizable, en especial, en su Autorización Ambiental Integrada.

La segunda se produce por la mayor exigencia de los niveles máximos de emisión durante el periodo nocturno respecto a los diurnos, cuando la actividad evaluada se encuentra en una zona industrial alejadas de usos sensibles, como el residencial.

2. ACTIVIDADES INDUSTRIALES EN SUELO NO URBANIZABLE

La evaluación del impacto acústico en el exterior está vinculado al concepto de área acústica, cuya clasificación se basa en el uso predominante del suelo, tal y como se indica en el artículo 7 de la Ley 37/2003 del Ruido, y el artículo 5 del Real Decreto 1367/2007.

Por tanto, es el planeamiento urbanístico, y en concreto la clasificación y calificación del suelo, la referencia a la hora de delimitar dichas áreas acústicas.

En el citado artículo 5 del Real Decreto 1367/2007 se dice lo siguiente:

La delimitación territorial de las áreas acústicas y su clasificación se basará en los usos actuales o previstos del suelo. Por tanto, la zonificación acústica de un término municipal únicamente afectará, excepto en lo referente a las áreas acústicas de los tipos f) y g), a las áreas urbanizadas y a los nuevos desarrollos urbanísticos.

Por tanto, las áreas acústicas, para las que se definen los valores límite de emisión y los objetivos de calidad acústica, estarán sobre suelo urbano o urbanizable, pero no sobre suelo

* **Autor de contacto:** r.perera@iberacustica.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

no urbanizable, dado que éste carece de uso, salvo los casos de los terrenos ocupados por infraestructuras, los espacios naturales o, incluso, las zonas de reservas de sonidos de origen natural o zonas tranquilas en campo abierto.

A la hora de evaluar el impacto acústico de una actividad (sin considerar el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica), se determinan los niveles de inmisión con origen en dicha actividad, y se comparan con los niveles máximos establecidos en función del área acústica.

El problema viene cuando nuestra actividad industrial se encuentra fuera del casco urbano, en terrenos clasificados urbanísticamente como no urbanizables. Existen multitud de casos de este tipo, desde pequeñas granjas o explotaciones ganaderas, a grandes plantas industriales.

Muchas de estas actividades son, por su naturaleza, muy ruidosas, y se sitúan en entornos aislados para evitar afecciones acústicas, entre otros motivos.

En estos casos es muy común evaluar la actividad en su perímetro, y comparar los niveles obtenidos con los máximos para un uso industrial, por ser el que le correspondería si estuviese en un área acústica. De hecho, estas indicaciones aparecen en muchas Autorizaciones Ambientales Integradas.

Sin embargo, si aplicamos los criterios descritos en el Real Decreto 1367/2007, y puesto que estas actividades se encuentran en suelo no urbanizable, no serían de aplicación dichos límites. Lo correcto, y en nuestra opinión, lo sensato, sería establecer los límites de inmisión en el área acústica más próxima a esta actividad, que normalmente será el casco urbano del municipio, algún área residencial o incluso un espacio natural protegido.

Con esta práctica de imponer los límites sobre el perímetro se generan en ocasiones incumplimientos que, en realidad, no están generando afecciones acústicas; es decir, no están molestando a nadie.

Estos incumplimientos conllevan la necesidad de ejecutar medidas correctoras, que habitualmente suponen importantes costes económicos, y cuyo beneficio es más que cuestionable.

Si la evaluación se realiza sobre los receptores más próximos (sean estos viviendas, espacios naturales o zonas tranquilas), aplicándoles sus límites correspondientes, estaremos determinando si realmente existe afección acústica sobre dichos receptores o no.

Es cierto que esta evaluación puede ser compleja, sobre todo cuando la distancia entre los emisores y estos receptores sensibles es grande (algo habitual).

En estos casos, en los que es más que probable que la afección sea nula, se pueden realizar mediciones en puntos intermedios, en los que aún se perciba la actividad, pero los niveles registrados cumplan con los valores límite correspondientes a los receptores. Si se cumple en estos puntos intermedios, también se cumplirá en el área sensible a evaluar.

Esta misma filosofía de evaluar sobre el receptor, y no en el entorno del emisor, se puede trasladar al entorno urbano. Por ejemplo, en la evaluación de equipos en las cubiertas de

los edificios, cuando estos no son residenciales, se tiende a medir a 1,5 m del límite del edificio emisor. Al tratarse de un entorno urbano, habitualmente se le aplicarán los niveles máximos del uso residencial.

Sin embargo, a esta distancia en muchas ocasiones no hay receptores. Las edificaciones más próximas se encuentran más alejadas, o al otro lado de la calle, por lo que los niveles que realmente están recibiendo son menores que los medidos.

O, por el contrario, las fachadas que pudieran estar afectadas se encuentran a una mayor altura respecto de la cubierta en la que se encuentran los equipos evaluados, por lo que la medida a nivel de la cubierta podría dar un resultado menor que el nivel al que están expuestas dichas fachadas, sobre todo en presencia de pantallas acústicas o petos.



Figura 1. Vista de equipos en cubierta apantallados en presencia de edificaciones residenciales de mayor altura. (Fte: Google Earth)

Por tanto, si queremos evaluar la afección de estos equipos en cubierta, lo sensato sería medir sobre las fachadas de los edificios receptores más próximos, respetando las distancias de medida que minimicen las reflexiones no deseadas.

De nuevo, el proceso de medición se complica, puesto que sería necesario acceder a dichos edificios, pero debemos intentar hacer una evaluación consistente con la realidad, y no declarar incumplimientos en situaciones en las que no se están generando afecciones.

Esta filosofía de evaluar en el receptor se encuentra en algunas normativas autonómicas, como la Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León.

En el punto c de su anexo V.I *Método de evaluación de niveles de inmisión sonora en inspección de actividades* se dice que en el exterior de recintos se medirá a 1,5 metros de las fachadas o límites de las propiedades que pudieran estar afectadas por la inmisión de los niveles sonoros.

De esta forma, el punto de medida se localiza en los receptores, y no en los emisores, y los niveles máximos a aplicar serán los correspondientes al área acústica en la que se sitúe el receptor.

3. LÍMITES DE RUIDO NOCTURNOS PARA ACTIVIDADES INDUSTRIALES FUERA DEL CASCO, O EN POLÍGONOS INDUSTRIALES

Otro caso que queremos comentar, en el que la aplicación del Real Decreto 1367/2007 puede llevar a situaciones poco lógicas, se produce por el hecho de establecer en áreas industriales niveles más restrictivos durante el periodo nocturno.

Esta medida, lógica en entornos residenciales, no parece tener justificación en un entorno industrial, más allá de garantizar que, en el caso de que existan viviendas próximas, los niveles en recepción sean más bajos.

Pongamos un ejemplo que nos hemos encontrado al realizar una auditoría acústica a una planta de fundición.

Esta actividad se encuentra en un polígono industrial, en una zona muy alejada del casco urbano, y de cualquier otro receptor, salvo el resto de naves del polígono.

La actividad principal es la recepción de piezas metálicas que se trituran para posteriormente fundirse en un horno.

El proceso de trituración genera niveles sonoros muy elevados, y el funcionamiento del horno no se detiene durante la noche.

El resto de naves de su entorno son pequeños talleres de vehículos, carpinterías, empresas de logística, cuya actividad se desarrolla únicamente durante el periodo diurno.

Pues bien, al imponer niveles nocturnos más exigentes en este entorno, las labores de trituración y los procesos más ruidosos se deben realizar durante el día, en el que el resto de naves también están abiertas. Sin embargo, si se hicieran por la noche, al ser la única actividad en funcionamiento, no generarían molestias en el resto de actividades.

Esta situación se evitaría si los niveles máximos para áreas acústicas de uso mayoritario industrial fueran los mismos en los distintos periodos de evaluación. Al fin y al cabo, la actividad que se desarrolla requiere unas condiciones acústicas iguales, independientemente del momento del día o de la noche en la que se lleve a cabo.

Al igual que sucedía en el caso anterior, si la evaluación se traslada también a proteger al receptor, la necesidad de niveles de emisión más bajos durante la noche quedaría automáticamente conseguida en aquellas áreas colindantes con usos residenciales, que sí requieren de niveles nocturnos más bajos.

4. CONCLUSIONES

En esta comunicación se han descritos dos situaciones en las que en ocasiones la aplicación del Real Decreto 1367/2007 conlleva declaraciones de incumplimiento cuando no existe una afección acústica real.

En ambos casos, la evaluación de la afección acústica representaría mejor la existencia o no de afecciones reales si

dicha evaluación se trasladara al receptor, en lugar de evaluar los niveles en el entorno del emisor.

Somos conscientes que ello supone una dificultad mayor a la hora de realizar las mediciones *in situ*, pero creemos que debemos intentar identificar mejor aquellas situaciones que realmente están generando molestias o afecciones acústicas, evitando declaraciones de no conformidad en situaciones en las que no existen tales afecciones.

Consideramos que son aspectos a tener en cuenta durante el trabajo de redacción del nuevo decreto de desarrollo de la Ley 37/2003 del Ruido, con el fin de que las declaraciones de cumplimiento o incumplimiento de actividades e instalaciones reflejen la ausencia o no de afecciones reales.

5. REFERENCIAS

[1] Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. BOE nº 276 de 18 de noviembre de 2003.

[2] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. BOE nº 254 de 23 de octubre de 2007.

[3] Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León. BOCL nº 107, de 9 de junio de 2009.

RETOS METODOLÓGICOS DE LA MODIFICACIÓN DEL REAL DECRETO 1367/2007 EN MEDIDAS DE RUIDO AMBIENTAL

Ángel Arenaz¹, Juan José Climent², Antonio Martínez³, Rocío Perera^{4*}, José Alberto Trujillo⁵

¹Audiotec, ²SGS, ³Macústica, ⁴Iberacústica, ⁵Labenac

RESUMEN

La actual redacción del RD 1367/2007 presenta procedimientos de medida de ruido ambiental que, en algunos aspectos, no se concretan lo suficiente para garantizar una aplicación homogénea de los mismos.

En algunos casos es posible recurrir a especificaciones de normas, aunque siguen quedando otros aspectos sin concretar, que cada laboratorio resuelve según sus criterios.

Los ejercicios de intercomparación entre laboratorios, además de evaluar su competencia técnica, permiten obtener información sobre los propios protocolos de ensayo, mediante estudios estadísticos de los resultados y las dispersiones obtenidas.

Estas diferencias en los resultados se han observado tanto en los últimos ejercicios de intercomparación, en los que cada laboratorio aplica sus propios criterios de muestreo espacial, como en varios ejercicios internos realizados dentro de FEDAOC, en los que se partió de los mismos datos de entrada y cada laboratorio determinó los resultados aplicando únicamente la metodología de cálculo del RD.

Se constatan así diferencias significativas debidas a las distintas técnicas de muestreo y a las interpretaciones en los procedimientos de cálculo.

Se proponen mejoras en los criterios de muestreo espacial y temporal, adaptados a las diferentes casuísticas, y procedimientos de cálculo homogéneos, destinados a mejorar la repetibilidad y reproducibilidad de los ensayos.

ABSTRACT

The actual wording of the RD1367/2007 presents environmental noise measurement procedures that, in some facets, are not specific enough to guarantee their homogeneous application.

In some cases, it is possible to resort to standard specifications. However, other aspects remain unspecified, which are solved by each laboratory according to its own criteria.

As a result of the intercomparison exercises between laboratories, in addition to assessing their technical competence, information is acquired about the test protocols

themselves, through statistical studies of the results and the deviations obtained.

These differences in the results have been noted in the last intercomparison exercises, in which each laboratory applies its own spatial sampling criteria, as well as in several internal exercises carried out within FEDAOC (Spanish Federation of Control Organism Associations), in which the same input data were used and each laboratory determined the results by solely applying the Royal Decree-Law's calculation methodology. Thus, significant differences were found due to the variety of sampling techniques and to the interpretations of the calculation procedures.

Improvements are suggested in the spatial and temporal sampling criteria, adapted to the different cases, and homogeneous calculation procedures, aiming to improve the repeatability and reproducibility of the tests.

Palabras Clave— Acústica Ambiental, Inspección de ruido, Real Decreto 1367/2007, Ejercicio de Intercomparación,

1. INTRODUCCIÓN

En el seno de FEDAOC se ha formado un grupo de trabajo de acústica, completamente abierto a todos los laboratorios de ensayos acústicos que cuenten con la acreditación de ENAC en este ámbito, en el que actualmente participan 44 laboratorios. Su principal objetivo es compartir información y experiencia con el objeto de mejorar y homogenizar metodologías de medida. Actualmente participa en los grupos de trabajo de la revisión del RD1367/2007 creados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

En el intercambio de información realizado entre los laboratorios del grupo se han constatado diferentes interpretaciones en la aplicación del RD1367/2007 que, en algunos casos, llevan a resultados significativamente diferentes. En esta comunicación queremos mostrar la importancia de estas diferencias y la consiguiente necesidad de una mayor concreción en la redacción de aspectos metodológicos y de cálculo del RD1367/2007.

* **Autor de contacto** juanjose.climentballester@sgs.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. ALGUNAS INDETERMINACIONES EN LA APLICACIÓN DEL RD1367/2007

A continuación se muestran algunas de las ambigüedades identificadas, que consideramos de mayor trascendencia.

2.1. Ubicación del punto de medida

La redacción actual del RD1367/2007 permite distintas interpretaciones en lo relativo a la ubicación del punto de medida.

En los trabajos y debates dentro del grupo se han detectado distintos criterios de aplicación de los protocolos de la norma para la localización del punto de medida en ciertas situaciones, como las siguientes:

- Se realizan tres mediciones en el punto de evaluación, identificado como el punto de mayor afección mediante un muestreo previo; o se emplean tres puntos distintos, con una medida en cada punto; o incluso se emplean tres puntos, con tres medidas en cada punto.
- La decisión de la localización del punto de medida se realiza en función del índice L_{Aeq} o el $L_{K_{eq}}$.
- Cuando la fuente de ruido está situada en la cubierta de edificaciones, las medidas se realizan a pie de calle o sobre la cubierta.
- En instalaciones industriales de gran tamaño, a la hora de realizar el muestreo para determinar el o los puntos de evaluación, se realizan las mediciones siempre a 1,5 m del suelo y 1,5 m del límite de la propiedad, o se considera la existencia de áreas acústicas sensibles en su entorno, así como las posibles sombras acústicas de obstáculos.

Los diferentes criterios empleados por los laboratorios quedan patentes en ejercicios de intercomparación, en los que se obtiene una dispersión importante en los resultados, originada tanto por la heterogeneidad en la interpretación de la norma, como por otros factores, como la detección o no de penalizaciones en el punto de evaluación.

2.2. Aplicación del método de cálculo

Conocida la problemática asociada a los ensayos, vinculada a la fuente de ruido a evaluar, al propio escenario, así como a los criterios de actuación de los laboratorios, y cuyas altas dispersiones quedan evidenciadas en los resultados obtenidos en los ejercicios de intercomparación, se decide, a través del grupo de trabajo, acotar aún más las variables, para intentar determinar cómo afecta en el resultado de la evaluación el criterio de actuación de los laboratorios a la hora de aplicar el método de cálculo dado en la legislación.

Para ello, se generan tres escenarios diferentes:

- Escenario 1: los registros de ruido de la fuente son mucho mayores que el ruido residual.

- Escenario 2: el ruido residual tiene una influencia en los resultados obtenidos.
- Escenario 3: el ruido residual es del mismo orden que el ruido de la fuente a evaluar, pudiendo limitar el resultado de la inspección.

A los laboratorios participantes se les ha entregado, para cada escenario, las 3 muestras de 5 segundos del ruido ambiental con la fuente a evaluar, y las 3 muestras de ruido residual. Con ello, quedan fuera del alcance del ejercicio las dispersiones debidas al propio escenario, el posicionamiento del punto de medida, o incluso la selección de muestras, así como la instrumentación utilizada, quedando, únicamente, como fuente de dispersión, los criterios del laboratorio a la hora de procesar los datos y obtener el índice de evaluación.

En el ejercicio han participado un total de 13 laboratorios de ensayos acústicos, todos ellos acreditados ENAC en el alcance de evaluación de ruido ambiental de acuerdo al Anexo IV del Real Decreto 1367/2007.

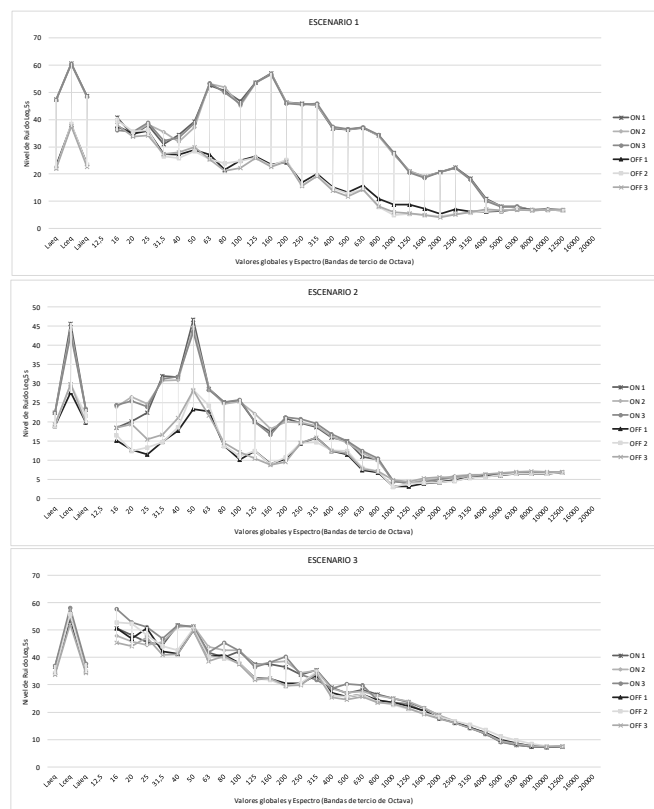


Figura 1. Registros de ruido propuestos para el ejercicio.

2.2.1. Resultados obtenidos – Escenario 1

Los resultados obtenidos son muy parejos, salvo en el cálculo de las incertidumbres, donde aparece una gran variabilidad de los resultados. En algunos casos el laboratorio justifica los criterios de cálculo de la incertidumbre asociada.

En cuanto a los resultados presentados, el laboratorio 8 presenta redondeado el L_{Aeq} ; y el laboratorio 9 no ha considerado penalización por tonalidad.

Sobre el índice de evaluación, 9 laboratorios presentan el mismo resultado, ya redondeado; 3 laboratorios presentan un resultado coincidente, previo al redondeo, con un decimal, y un único laboratorio presenta un resultado diferente al resto, derivado de la no aplicación de la penalización por tonalidad.

	ESCENARIO 1					
	L_{Aeq}	Kc	Kt	Ki	L_{keq}	Incertid.
LAB1	47,4	3	3	0	53	1
LAB2	47,4	3	3	0	53	± 2
LAB3	47,4	3	3	0	53	2,8
LAB4	47,4	3	3	0	53	4
LAB5	47,4	3	3	0	53	1,2
LAB6	47,4	3	3	0	53	0
LAB7	47,4	3	3	0	53,4	1
LAB8	47	3	3	0	53	4
LAB9	47,4	3	-	0	50	5
LAB10	47,4	3	3	0	53,4	4,3
LAB11	47,4	3	3	0	53	2
LAB12	47,4	3	3	0	53	1,7
LAB13	47,4	3	3	0	53,4	4

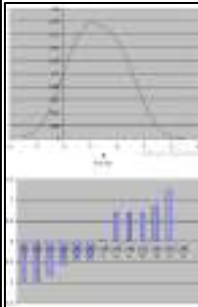


Figura 2. Resultados obtenidos – Escenario 1

2.2.2. Resultados obtenidos – Escenario 2

En el escenario 2, de inicio, se observan diferencias en el parámetro L_{Aeq} , donde un grupo de laboratorios presentan un resultado de 19,6 dBA (o 20 dBA para el caso de los laboratorios que dan el valor redondeado); y un segundo grupo donde el resultado es de 22,5 dBA. Estas diferencias pueden estar vinculadas al criterio utilizado por el laboratorio para escoger qué muestra de “off” debe compararse con cada muestra de “on”, lo que hace que, en función del criterio aplicado, la diferencia entre la muestra “on” y la muestra “off” puede o no superar los 3 dB, lo que deriva en otro posible motivo de la dispersión, como es el criterio de actuación del laboratorio, cuando las diferencias entre el nivel de “on” y el de “off” es inferior a 3 dB, donde el criterio de actuación de algunos laboratorios es corregir el nivel en 3 dB, y otros, simplemente no lo corrigen por ruido de fondo, considerando un límite de medida.

Al no haber diferencias, en este caso, en el cálculo de las penalizaciones, las diferencias se trasladan al índice de evaluación L_{keq} , que se mueve entre los 29 dBA y los 32 dBA.

Cabe destacar que estas diferencias, en determinadas situaciones ya implicaría la diferencia entre el cumplimiento o el incumplimiento de una determinada actividad o instalación.

Se mantienen las diferencias en las incertidumbres asociadas a los ensayos entre los distintos laboratorios.

	ESCENARIO 2					
	L_{Aeq}	Kc	Kt	Ki	L_{keq}	Incertid.
LAB1	19,6	6	6	0	29	1
LAB2	22,5	6	6	0	29	± 2
LAB3	19,6	6	6	0	29	2,2
LAB4	22,5	6	6	0	29	3
LAB5	22,5	6	6	0	29	1,2
LAB6	22,5	6	6	0	≤32	±1
LAB7	22,4	6	6	0	31,4	2
LAB8	20	6	6	0	29	>7
LAB9	20	6	6	0	29	2
LAB10	22,5	6	6	0	28,8	2,4
LAB11	22,5	6	6	0	29	2
LAB12	20	6	6	0	29	2,4
LAB13	22,5	6	6	0	29	1,3

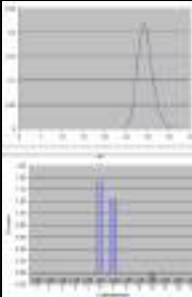


Figura 3. Resultados obtenidos – Escenario 2

2.2.3. Resultados obtenidos – Escenario 3

En este escenario, los resultados del parámetro L_{Aeq} son más estables. Así, la mayor parte de los laboratorios presentan el mismo valor, de 36,8 dB, indicándose, en algún caso, que se trata de un valor límite. Un laboratorio no declara un resultado, indicando la imposibilidad de hacerlo por el ruido residual; y un laboratorio corrige 3 dB.

En este escenario, la mayor variabilidad está condicionada por la aplicación de las penalizaciones. Así, en el caso de la penalización por baja frecuencia (K_f), hay laboratorios que aplican +6 dB (al existir la componente en el ruido medido); y otros laboratorios, a pesar de ello, no aplican la penalización, al considerar que dicha componente está contenida en el ruido ambiental.

Algo similar sucede con la componente tonal, donde algunos laboratorios aplican una tonalidad (K_t) de +3 dB; y otros no aplican penalización por componente tonal.

Al final, como resultado de todo ello, se observan unas variaciones en el índice de evaluación L_{keq} que van desde los 37 dBA hasta los 46 dBA, lo que supone diferencias en la evaluación, para los mismos datos de entrada, de 9 dB y, tal y como se aprecia en los resultados estadísticos, una clara bimodalidad de la curva de densidad de Kernel.

	ESCENARIO 3					
	L_{Aeq}	Kc	Kt	Ki	L_{keq}	Incertid.
LAB1	36,8	6	3	0	37	1
LAB2	36,8	6	0	0	≤ 43	± 2
LAB3	< 36,8	N.E.	3	0	< 40	2,8
LAB4	36,8	LM	0	0	43	4
LAB5	36,8	0	3	0	≤ 36,8	1,3
LAB6	36,8	0	0	0	≤ 37	0
LAB7	36,8	6	3	0	45,8	1
LAB8	(*)	0	0	0	0	0
LAB9	36,8	6	--	--	43	5
LAB10	36,8	0	3	0	39,8	4,6
LAB11	36,8	≤6	3	0	≤40+6	2
LAB12	33,8	6	3	0	43	2,7
LAB13	36,8	---	---	---	36,8*	4

No se puede calcular el valor asignado por consenso de los laboratorios, por lo que no se podría calcular el ZScore.

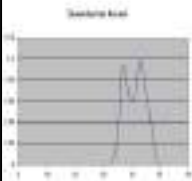


Figura 4. Resultados obtenidos – Escenario 3

2.2.4. Conclusiones

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos en el ejercicio propuesto, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Queda demostrado que la variabilidad de los resultados obtenidos en una inspección de ruido no sólo es debido al escenario de ensayo, a la propia variabilidad de la fuente, o a los criterios de muestreo temporal y espacial escogidos por el laboratorio de ensayos, sino que existen otros condicionantes que aportan variabilidad en la etapa de procesado de los datos y el cálculo del índice de evaluación.
- Dicha variabilidad está muy vinculada a los criterios de actuación en referencia a la corrección por ruido residual, tanto en su aplicación sobre el parámetro principal (L_{Aeq}) como en los índices utilizados para el cálculo de las penalizaciones asociadas al ruido medido (L_{Ceq} ; L_{A1eq} ; Espectros). Por ello, en los casos en los que el ruido residual no tiene apenas influencia en los niveles de ruido medidos de la fuente a evaluar, los resultados entre los diferentes laboratorios apenas varían.
- Cuando el ruido residual tiene una clara influencia en los niveles de ruido medidos (incluyendo los parámetros que permiten los cálculos de las penalizaciones) es donde las diferencias se hacen patentes y son debidas, fundamentalmente a:
 - Criterios a la hora de la selección de la muestra de ruido residual (entre las 3 muestras de 5 segundos obtenidas).
 - Criterios de corrección por ruido de fondo, sobre todo en los casos límite (cuando las diferencias entre el ruido residual y el ruido de la fuente a evaluar es menor o igual a 3 dB).
 - Criterios de aplicación de penalizaciones cuando los índices usados para el cálculo de dicha penalización están limitados por ruido de fondo.
- También pueden darse diferencias de criterio en la interpretación de la legislación de referencia, en la aplicación de las penalizaciones, como puede ocurrir en el caso concreto de la penalización por componente tonal.
- Además, existen claras diferencias en el cálculo de las incertidumbres asociadas a los ensayos, que también tienen una incidencia en la evaluación de la fuente.

3. OTROS CASOS

El objetivo es identificar otros aspectos relativos al proceso de medida y evaluación de ruido ambiental del RD 1367/2007, que no están definidos, o no con el suficiente detalle, lo que genera mayor dispersión aún, en cuanto a criterios de interpretación, cálculo, etc., en línea con todo lo anterior.

- El RD 1367/2007 establece la necesidad de evaluar el ruido de fondo con la actividad parada (punto 3.4 del Anexo IV), de forma análoga al nivel sonoro, y ya se ha comentado la dificultad que genera cuando el ruido de fondo está muy próximo al nivel de inmisión sonora (correcciones o no, valor límite), pero no queda definida la sistemática de aquellos casos donde no sea posible evaluar el ruido de fondo, por ejemplo porque la actividad no cesa (centrales eléctricas, otro tipo de industrias, etc.) o que cuando sea posible parar dicha emisión, la casuística del entorno ha variado (viento, tráfico o industrias cercanas, etc.). ¿Valor límite? ¿Se aplican penalizaciones? ¿Qué penalizaciones, las que arroje el nivel de inmisión? ¿+9 dB como caso más desfavorable?
 - El procedimiento indica que los intervalos de tiempo entre medidas han de ser mínimo 3 minutos. Se desprende del documento que este intervalo está previsto para actividades que tengan una duración prolongada en el tiempo, como por ejemplo una actividad musical, etc. Pero, ¿qué ocurre en los casos donde no sea posible respetar los tiempos establecidos? Por ejemplo, el levantamiento de una barrera o persiana de un local comercial, o la descarga de un camión, donde ya no solo es que no sea posible respetar los 3 min, si no que quizás no da tiempo ni a realizar las 3 medidas.
 - En línea con lo anterior, otro aspecto controvertido es la duración de las medidas o periodo de integración, la duración de fases, etc. El documento establece una medida mínima de 5 segundos, para las diferentes fases que se detecten. No obstante, no queda bien definido los tipos de ruido o fases, es decir, qué diferencia (en nivel, tipo de ruido, tipo de fuentes, etc.) constituye una fase. Si un tipo de fuente emite diferentes ruidos o intensidades ¿se evalúan las diferentes fases en periodos de 5 segundos, o por el contrario se amplía el tiempo de integración?
- Estos son solo algunos casos más de parámetros, procesos o acciones a definir para mejorar y homogeneizar los resultados entre los diferentes agentes, no solo laboratorios, si no también administraciones, policía local, etc.

4. UN EJEMPLO CONCRETO DE DEBATE PARA MEJORAR EL REAL DECRETO 1367/2007. CORRECCIÓN POR COMPONENTES TONALES

Situación actual: El Real Decreto 1367/2007 establece lo siguiente en relación a las correcciones por componentes tonales:

5. CONCLUSIONES

Con solo algunos ejemplos de las diversas interpretaciones que pueden hacerse de la actual redacción del RD1367/2007, queda patente la necesidad de una revisión de este documento, para una mayor concreción de cuestiones técnicas relativas a la metodología de medida.

El reto no es sencillo, no solo hay que dar respuesta a muchas cuestiones, además cada decisión técnica debe equilibrarse con aspectos económicos, y de salud entre otros. Lo que abrirá a su vez nuevos debates dentro de los grupos de trabajo de revisión del RD1367/2007 creados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, pero esto ya es otra historia...

6. REFERENCIAS

[1] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

[2] UNE-ISO 1996-2:2020. Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de presión sonora.

[3] Decreto 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica, y se adaptan sus anexos

[4] Decreto 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

[5] UNE-ISO 226:2013. Acústica. Líneas isofónicas normales.

RD 1367/2007 – ESTUDIO DE LOS REQUISITOS DE CAPACIDAD TÉCNICA Y SOLVENCIA

Carmen Carro Rejas *

ENAC- Entidad Nacional de Acreditación

RESUMEN

Como ocurre en otros países de Europa, el despliegue de normativa nacional básica en documentos distintos según el ámbito regional o local de aplicación genera un alto grado de distribución de competencias en la aplicación del Real Decreto 1367/2007, también para la gestión de los recursos competentes para realizar trabajos al amparo del documento, con el riesgo de que haya desequilibrios en la exigencia o de que no se disponga de medios para el control del cumplimiento

En esta ponencia, primero se analiza la situación actual de casos representativos de Europa y algunas Comunidades Autónomas en lo referente a la capacidad técnica y solvencia demostrada de las entidades que realizan evaluaciones de ruido ambiental, en cumplimiento de los respectivos documentos normativos. Después, se recogen las conclusiones del análisis, con ánimo de aportar ideas en el debate de los cambios y retos que la revisión del RD 1367/2007 debe abordar.

ABSTRACT

Like other European countries, in Spain the spread of basic national regulation in different documents depending on the regional or local scope of application generates a high degree of distribution of competences in the application of Royal Decree 1367/2007, also for the management of the competent resources to carry out work under the document, putting at risk the equity of the requirements and also the availability of resources for controlling its compliance.

This paper first analyses the current situation of illustrative cases in Europe and some Regions of Spain with regards to the technical capability and proven solvency of entities carrying out environmental noise assessments, in compliance with the corresponding regulations. Following, it sets out the conclusions of the analysis, in order to bring ideas to the debate on the changes and challenges to be addressed in the revision of RD 1367/2007.

Palabras Clave— competencia técnica, capacidad, solvencia, acreditación, RD 1367/2007.

1. INTRODUCCIÓN

En España se desarrolló la Ley 37/2003 del Ruido, de 17 de noviembre, para incorporar parcialmente al derecho interno las previsiones de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. El RD 1367/2007, de 19 de octubre, desarrolla esta Ley y es, por tanto, el marco normativo en el que se desarrollan en España la zonificación y la evaluación de los objetivos de calidad y de las emisiones acústicas

Recientemente se ha iniciado un proceso de revisión de este documento, que cumple en estas fechas 16 años, y con él el replanteamiento de criterios que la experiencia práctica ha demostrado que generan dudas o problemas para su aplicación. El RD 1367/2007 no desarrolla un reconocimiento de la competencia para el ejercicio de las actividades derivadas, y sólo algunos de los documentos reglamentarios autonómicos o municipales contienen criterios en este sentido. Resulta crítico que el personal que realice evaluaciones con un documento con especificaciones de carácter técnico, como es el RD 1367/2007, tenga las competencias adecuadas y suficientes, para una comprensión y aplicación técnica solvente de los criterios, pero también que actúe con la profesionalidad requerida en un ejercicio de evaluación de la conformidad frente a unos requisitos y límites legales que han sido diseñados para la protección de las personas y el medioambiente contra los efectos perjudiciales del ruido.

Por ello, el análisis de la situación actual a nivel nacional y europeo parece un paso necesario para poder debatir sobre cómo debe tratarse la gestión de las competencias en el futuro documento, pues parte de su éxito estará garantizado si se lleva a la práctica de manera solvente y técnicamente adecuada.

* **Contacto de autor:** ccarro@enac.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. DOCUMENTOS ESTATALES

La competencia técnica únicamente se cita en el Artículo 31 del RD 1367/2007 de manera genérica [1]:

Artículo 31. Entidades que realizan la evaluación.

Con el fin de que los resultados obtenidos en los procesos de evaluación de la contaminación acústica sean homogéneos y comparables, las administraciones competentes velarán por que las entidades encargadas de la realización de tales evaluaciones tengan la capacidad técnica adecuada. Asimismo, velarán por la implantación de sistemas de control que aseguren la correcta aplicación de los métodos y procedimientos de evaluación establecidos en este real decreto, para la realización de evaluaciones acústicas.

El articulado, sin carácter de obligatoriedad, no ha propiciado que en todos los casos las administraciones competentes definan los requisitos para reconocer la capacidad técnica de las entidades, ni a que articulen un sistema de control de este reconocimiento. No hay tampoco referencias al respecto en la Directiva 2002/49/CE, la Ley 37/2003, ni en el RD 1513/2005 ([2], [3] [4]). La situación que se da es que en algunos territorios no hay un control de la capacidad técnica en la aplicación del RD 1367/2007, mientras que en otros sí se ha desarrollado, pero de formas diversas y no siempre equivalentes. Cabe comentar que a esto se suma que siguen siendo de aplicación documentos normativos anteriores al RD 1367/2007, como por ejemplo el Decreto 266/2004 de la Comunidad Valenciana o el Decreto 19/1997 de Extremadura, que se mantienen vigentes por no tener el Real Decreto cláusulas derogatorias.

Para obtener un análisis de los requisitos actuales legislados y su aplicación, se ha analizado la regulación autonómica [5] y la información pública. El análisis ha profundizado en 4 puntos, que se enumeran a continuación, junto a las conclusiones:

1. Existencia de un sistema de reconocimiento de la competencia técnica y, de haberlo, a qué ámbito de actividad aplica: en 10 de las 17 comunidades autónomas la legislación menciona sistemas concretos de reconocimiento de la competencia para la evaluación del ruido ambiental por parte de la administración competente. Adicionalmente en 2 comunidades se hace un control de las entidades que realizan controles en instalaciones industriales sujetas a autorización (AAI), siendo requisito disponer de la acreditación otorgada por ENAC (Entidad Nacional de Acreditación) o entidad equivalente para la evaluación de ruido ambiental según RD 1367/2007, aunque no lo mencione explícitamente el decreto autonómico en materia de ruido ambiental.

2. Requisitos para ejercer las funciones o labores que se describen en el documento normativo: en 11 comunidades

se contemplan, pero sus requisitos son dispares y no siempre compatibles; van desde el reconocimiento de un tercero (acreditación por ENAC) hasta la declaración responsable del cumplimiento de requisitos propios. En la Figura 1 se ilustra esta disparidad, con 4 colores que identifican los diferentes sistemas de reconocimiento, categorizados según si aplican a toda la actividad legislada o sólo a un ámbito, y también según si se requiere evaluación de las entidades por la Entidad Nacional de Acreditación, otro reconocimiento por terceros o de ningún tipo.



Figura 1. Criterios de reconocimiento de la capacidad técnica y solvencia, por Comunidades Autónomas.

3. Órganos de control del cumplimiento de los requisitos de competencia técnica. Generalmente se alude a la propia Administración competente en materia de contaminación acústica, en pocas ocasiones se articula designando concretamente el modelo de control.

4. Seguimiento del mantenimiento de los requisitos en el tiempo. Si bien en 10 de los documentos se articulan sistemas de reconocimiento por parte de la Administración de los técnicos o entidades competente en materia de ensayos acústicos, desafortunadamente son muchos los casos en los que no hay información clara sobre el control que se hace del cumplimiento de los requisitos. Esto es un problema a la hora de valorar las bondades de los distintos sistemas. En aquellos documentos normativos donde se menciona la necesidad de que los trabajos se desarrollen por personal competente, pero no se articulan mecanismos de autorización por la Administración y reconocimiento de terceros, la falta de información es total.

3. DESARROLLOS EN OTROS PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA

Dinamarca, Italia o Portugal son países vecinos que tienen desarrollados sistemas de reconocimiento o acreditación de la capacidad técnica a nivel estatal son ([6], [7], [8]):

Las conclusiones del análisis de los requisitos desarrollados en otros países, siguiendo los mismos puntos considerados en el análisis del apartado anterior, son:

1. Existencia de un sistema de reconocimiento de la competencia técnica y, de haberlo, a qué ámbito de actividad aplica: en todos los casos se articula un listado único estatal, que facilita la movilidad geográfica por el país; el listado está administrado por el Ministerio correspondiente, con apoyo de las administraciones regionales o de instituciones designadas.

2. Requisitos para ejercer las funciones o labores que se describen en el documento normativo. Encontramos varios planteamientos:

- Sistema de reconocimiento de la capacidad apoyado en la evaluación técnica por la entidad de acreditación y el posterior reconocimiento por la institución de referencia. Por ejemplo, en Portugal se requiere la acreditación como laboratorio de ensayo por una entidad nacional de acreditación firmante de los acuerdos multilaterales (MLA).
- Sistema de competencias por titulaciones y realización de exámenes a los técnicos, como en Italia. Necesita de una conexión con los programas docentes universitarios y de una revisión del contenido de los cursos de capacitación.
- Sistemas de reconocimiento con varias opciones: organizaciones o persona, como en Dinamarca. En función del tamaño de la empresa, ésta puede decidir acreditar al laboratorio, que es responsable de la cualificación de sus técnicos, o certificar a las personas, que son responsables de su propia cualificación.

3. Órganos de control del cumplimiento de los requisitos de competencia técnica: en los tres casos se hace mención en la legislación a una institución de referencia/ mesa de coordinación técnica, cuya labor es dar apoyo a la Administración competente, realizar los desarrollos técnicos específicos para el documento, realizar el control del reconocimiento de la capacidad técnica, incluso son designados para la organización de intercomparaciones, la resolución de consultas y el establecimiento de criterios en caso de conflicto.

4. Seguimiento del mantenimiento de los requisitos en el tiempo. Encontramos varios sistemas, acordados con cada tipo de reconocimiento:

- Mantenimiento de las acreditaciones concedidas por terceros independientes.
- Renovación de la competencia de los técnicos mediante exámenes periódicos.
- En Dinamarca se requiere además la participación obligatoria cada 18 meses en intercomparaciones organizadas por el Laboratorio Nacional de Referencia.

En otros países como Francia, Alemania, Holanda y Bélgica, la legislación no define requisitos para quien realiza las mediciones o las evaluaciones de la conformidad. El motivo es que algunas normas son antiguas, o genéricas, que tienen después desarrollos regionales o municipales donde es posible que se hagan estas especificaciones sobre requisitos de capacitación y solvencia, según recoge el Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo relativo a la aplicación de la directiva sobre el ruido ambiental de conformidad con el artículo 11 de la Directiva 2002/49/CE.

4. DEBATE SOBRE LAS NECESIDADES Y LAS SOLUCIONES PARA UN NUEVO DOCUMENTO

Los análisis anteriores nos ayudan a conocer la situación en España y en los países vecinos. Esta información, junto a las lecciones aprendidas en la aplicación del RD 1367/2007 en sus 16 años de vigencia, llevan a identificar aspectos a contemplar en el nuevo documento, que refuercen sus bases y lo doten de herramientas para asegurar que sus criterios se aplican con competencia técnica y solvencia. Se tratan a continuación los más importantes, y se proponen ideas para debatir de cara a ser planteadas en el nuevo marco normativo:

- Coordinación de la estructura legislativa y los requisitos en los documentos normativos de nivel estatal, autonómico y municipal.

Es importante la claridad en la manera de legislar cómo coexistirán el documento estatal con otros desarrollos normativos autonómicos y municipales: mantenimiento de la coexistencia, derogación y plazos de transición necesarios, etc.

- Definición de los requisitos para el ejercicio de las actividades técnicas, aceptables para el mercado y para las Administraciones, y alineados con la tendencia en Europa y la regulación más actual de otros ámbitos equivalentes al control de la contaminación acústica: residuos, aguas, etc.

Es necesario debatir sobre si establecer un marco común a nivel estatal de reconocimiento de la competencia técnica, como en Italia, Dinamarca o Portugal. Es necesario analizar el impacto que genera en el mercado (empresas, administraciones, clientes, etc.) que entre municipios o regiones haya requisitos diferentes para la realización de trabajos para la evaluación de la contaminación acústica. Por ejemplo, para mediciones de las emisiones la realidad es que

los técnicos se desplazan por todo el territorio, por lo que un sistema homogéneo se adaptaría a esta realidad.

La competencia técnica y la actuación imparcial deberían ser los ejes principales de estos requisitos, para garantizar que el documento normativo de carácter técnico se aplica en la práctica de manera solvente. De ello depende el éxito de su implantación, el impacto que tenga en la mejora de la salud de los ciudadanos, y el apoyo que pueden tener las Administraciones en las entidades o personal competente para las labores de vigilancia y control del cumplimiento.

De los ejemplos analizados, tanto en otros países como en España, se pueden tomar ideas para definir un sistema de reconocimiento de la competencia, que habilite a entidades o personas que puedan ser designadas por la Administración para ejercer vigilancia o control, y ser consideradas incluso autoridad, lo que ayudaría al mejor tratamiento de los problemas de contaminación acústica que a día de hoy se gestionan de manera desigual según la Administración competente ante la que se presentan las quejas. En el caso de los informes de mediciones, hay que tener en cuenta que con sus resultados se toman decisiones en el día a día de la Administración. Un sistema consistente de control de la competencia técnica de los profesionales que realizan los trabajos serviría para optimizar recursos, especialmente en el caso de entidades locales con Ayuntamientos con menos recursos.

En base a las legislaciones analizadas y la situación existente, se aportan algunas ideas a considerar:

- Posibilidad de un reconocimiento por ámbitos, con requisitos diferenciados según la necesidad, como en algunos documentos autonómicos. Estos ámbitos podrían ser: la evaluación de objetivos de calidad, la zonificación acústica, las mediciones de ruido de emisores (actividades, infraestructuras, aerogeneradores, instalaciones en edificación, ...) y la medición de vibraciones.

- Sistema dual para la demostración de competencia técnica para la realización de los trabajos de evaluación, como el ilustrado en la Figura 2. El reconocimiento a las personas o entidades se otorgaría por dos vías, según el ámbito de trabajo, resultando más eficaz, flexible y práctico.

Para evaluaciones de ruido y vibraciones de grandes emisores, generalmente de competencia autonómica (industrias, infraestructuras, parques eólicos, etc) y evaluaciones de objetivos de calidad mediante medición, la propuesta es requerir laboratorios acreditados con la norma UNE-EN ISO/IEC 17025 para la evaluación de ruido ambiental o para la evaluación de las vibraciones, por ENAC u otros organismos de acreditación con acuerdo de reconocimiento, como garantía de competencia técnica

y de imparcialidad mediante acreditación como laboratorio de ensayo. Esto permite añadir requisitos de independencia, como hace la normativa de Cataluña, o en Madrid en el ámbito de las actividades industriales.

Para la evaluación de objetivos de calidad y para la zonificación con el uso de herramientas de cálculo, así como en la evaluación de pequeñas actividades para obtención de licencias en el ámbito local, puede resultar más viable el reconocimiento de la competencia de las personas mediante un sistema de habilitación en base al reconocimiento de la formación y la experiencia, o un sistema de certificación de las personas basado en la superación de cursos formativos específicos y de evaluaciones de las aptitudes. Puede recurrirse a estudios realizados en este sentido, como el NTP (Noise Training Project), en el que se analizó la situación de la cualificación profesional en acústica ambiental en Europa y propone 3 perfiles profesionales distintos, con los requisitos de formación y experiencia práctica ajustados a las funciones y responsabilidades. [9]

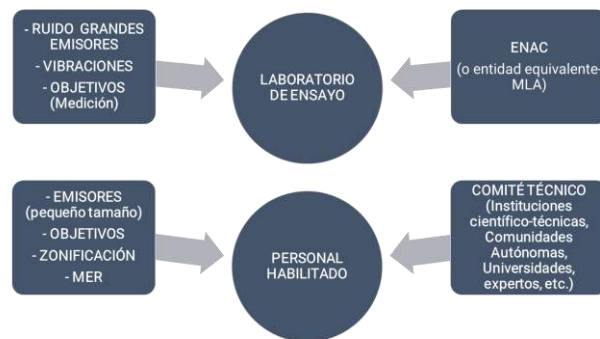


Figura 2. Esquema del sistema de reconocimiento de la competencia por ámbitos.

- Definición de los sistemas de seguimiento de la competencia.

La evaluación de las entidades o las personas y el reconocimiento para el ejercicio de las actividades, debería promover un seguimiento eficaz de que se mantienen las competencias en el tiempo. Además, un sistema coordinado entre administraciones, ágil en los trámites, permitiría la movilidad por el estado acorde con las necesidades de cada territorio.

- Designación de una institución técnica de apoyo. Es lo habitual en otros países europeos y sería una necesidad en España. Puede tratarse de un Comité multidisciplinar, un organismo científico-técnico especializado, un instituto tecnológico, etc., que ejerza funciones de asesoría en las Administraciones competentes en materia acústica (como lo es el Instituto Eduardo Torroja para el Ministerio de

Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, en el ámbito del Código Técnico de la Edificación [10]), en la interpretación de criterios técnicos del documento normativo, que publique guías u otros documentos que faciliten su aplicación práctica y vele por la actualización de los criterios al estado del arte. Asimismo, puede ser el órgano que asesore respecto a los requisitos de competencia técnica y participe en el sistema reconocimiento de estos.

5. CONCLUSIONES

La necesidad de establecer unos requisitos de competencia técnica en la legislación que regule la contaminación acústica es un punto clave a debatir, dadas las repercusiones para la sociedad, para el mercado y las Administraciones competentes. Una declaración de competencia técnica debe respaldarse con requisitos, especificaciones que se cumplen y con sistemas de evaluación y control.

En este trabajo se plantean conceptos para tratar en ese debate y opciones posibles, considerando el panorama actual de documentos normativos desarrollados, o bien al amparo de la legislación española, o de la Directiva de Ruido en otros países. En este análisis, la mayor dificultad ha sido valorar los efectos prácticos o reales de los distintos sistemas de regulación de la competencia técnica, ya que no se dispone de información completa sobre si se ha logrado un control más eficaz de las emisiones o una mayor protección contra la contaminación.

Ante esto, con los datos de que se dispone, se puede concluir que el debate sobre el modelo de evaluación de la competencia técnica debería enfocarse cambiando de un planteamiento que valora qué nivel de exigencia aplicar en función de los costes o las responsabilidades penales, a otro que gradúe la exigencia de competencia técnica demostrable según los efectos de la contaminación acústica en la salud, de manera que cuanto más crítica se al situación valorada, mayor sea el nivel de los requisitos y su control sobre los evaluadores de dicha situación.

6. REFERENCIAS

[1] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Publicado en: «BOE» núm. 254, de 23/10/2007.

[2] Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

[3] Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.

[4] Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

[5]

- Andalucía: Decreto 6/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Protección contra la Contaminación Acústica.
- Aragón: Ley 7/2010, de 18 de noviembre, de protección contra la contaminación acústica.
- Castilla y León: Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido.
- Cataluña: Decreto 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 16/2002, de 28 de junio, de protección contra la contaminación acústica, y se adaptan sus anexos.
- Comunidad de Madrid: Criterios sobre la realización de los controles establecidos en las Autorizaciones Ambientales Integradas, de marzo de 2022. Decreto 55/2012, de 15 de marzo, del Consejo de Gobierno, por el que se establece el régimen legal de protección contra la contaminación acústica.
- Comunidad Valenciana: Decreto 266/2004, de 3 de diciembre, del Consell de la Generalitat, por el que se establecen normas de prevención y corrección de la contaminación acústica en relación con actividades, instalaciones, edificaciones, obras y servicios.
- Extremadura: Decreto 19/1997, de 4 de febrero, de Reglamentación de Ruidos y Vibraciones.
- Galicia: Decreto 106/2015, de 9 de julio, sobre contaminación acústica.
- Islas Baleares: Ley 1/2007, de 16 de marzo, contra la contaminación acústica de las Illes Balears.
- Navarra: Decreto 135/1989. Instrucción Técnica IT-RUIDO-001 (2014) relativa al contenido mínimo de informes de medida de ruido en instalaciones.
- País Vasco: Decreto 213/2012, de 16 de octubre, de contaminación acústica. Guía IT- RUIDO-IPPC-01- Control de ruido en instalaciones IPPC existentes.
- Principado de Asturias: Decreto 27/2019, de 11 de abril, de Protección y Control Ambiental Industrial en el Principado de Asturias, por el que se crea el Registro de organismos de control ambiental del Principado de Asturias.
- Región de Murcia: Decreto 48/1998, de 30 de Julio, sobre protección del medio ambiente frente al ruido. Ley 4/2009, de 14 de mayo, de protección ambiental integrada.

[6] Dinamarca: Executive order N° 2362 from 26 November 2021 from the Ministry of Environment, concerning quality requirement to environmental measuring.

[7] Italia: Decreto Legislativo n° 42, de 17 de febrero de 2017

[8] Portugal: Decreto-Ley n.º 9/2007, de 17 de enero por el que se aprueba el Reglamento General del Ruido

[9] César Asensio Rivera, Ignacio Pavón García, José Alberto Trujillo Gallego, Juan Manuel López Navarro1 y Guillermo de Arcas Castro, Grupo de Instrumentación y Acústica Aplicada (Universidad Politécnica de Madrid). *La cualificación profesional en acústica ambiental*. Revista de acústica. Vol. 52.N.os 1 y 2

[10] <https://www.ietcc.csic.es/mision/>



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

NOR-2 Aspectos jurídicos de la lucha contra el ruido.



EL PROBLEMA DEL RUIDO PROCEDENTE DE LOS LOCALES DE OCIO NOCTURNO Y DE LAS AGLOMERACIONES. EL CASO DE LA C/ TRASÁLFÓNDIGA DE TORO (ZAMORA)

María José Rodríguez Domínguez

Abogada. Ilustre Colegio de Abogados de Salamanca.

RESUMEN

La autora trata, desde un punto de vista jurídico, la problemática acústica generada por la proliferación de locales de ocio nocturno y las aglomeraciones en torno a ellos en zonas de numerosas poblaciones y que provoca permanentes quejas vecinales. Para ello analiza la sentencia n. ° 264, de 20 de octubre de 2021, dictada por el Juzgado de lo Contencioso-Administrativo n. ° 1 de Zamora, procedimiento en el que intervino como abogada de los recurrentes, residentes en la calle Trasalfóndiga de Toro (Zamora). La falta de respuesta de los ayuntamientos ante el problema obliga a los afectados a acudir a la vía judicial en busca de solución. El incumplimiento de las condiciones establecidas en las licencias, el deficiente aislamiento acústico de los locales, la vulneración reiterada de la normativa nacional, autonómica y local sobre el ruido, la instalación de terrazas que comprometen la accesibilidad peatonal, la falta de planificación urbanística, entre otros, son factores que inciden en la calidad de vida de las personas y degradan nuestros entornos urbanos.

ABSTRACT

The author deals, from a legal point of view, with the acoustic problem generated by the proliferation of nightlife venues and the crowds around them in areas with numerous populations and which causes permanent complaints from residents. To do this, it analyzes sentence no. ° 264, of October 20, 2021, issued by the Contentious-Administrative Court no. ° 1 of Zamora, a proceeding in which she intervened as a lawyer for the appellants, residents of Calle Trasalfóndiga de Toro (Zamora). The lack of response from the municipalities to the problem forces those affected to go to court in search of a solution. Failure to comply with the

conditions established in the licences, the deficient acoustic insulation of the premises, the repeated violation of national, regional and local regulations on noise, the installation of terraces that compromise pedestrian accessibility, the lack of urban planning, among others are factors that affect people's quality of life and degrade our urban environments.

Palabras Clave: Ruido. Ocio. Derechos Fundamentales. Licencias.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido provocado por el ocio nocturno es un problema que genera una gran conflictividad social al enfrentar a vecinos afectados, a los titulares de los establecimientos públicos y a los ayuntamientos.

El hecho de residir en determinadas zonas urbanas, generalmente en el centro o cascos históricos, supone para los vecinos una fuente inagotable de molestias debido a la concentración de numerosos establecimientos de ocio y las aglomeraciones en torno a ellos hasta altas horas de la madrugada. Todo ello suele llevar aparejado con el tiempo la depreciación de las viviendas y la despoblación en busca de zonas residenciales tranquilas. Este el supuesto de hecho que motiva el recurso que culminó en la sentencia n. ° 264, de 20 de octubre de 1021, dictada por el Juzgado de lo Contencioso-Administrativo n. ° 1 de Zamora, sentencia firme que se reseña en esta comunicación.

2. LOS HECHOS MOTIVADORES DEL PROCEDIMIENTO JUDICIAL

Si bien nos centraremos en la problemática acústica de la principal zona de ocio del municipio de Toro (Zamora), dado los elementos característicos del caso, la problemática y su análisis es extrapolable a otros municipios con una población similar, así como pequeñas y grandes ciudades.

Toro es una población monumental de unos 8500 habitantes en la provincia de Zamora y un referente vinícola.

Nuestros clientes residen en la calle Trasfóndiga, a escasos 50 metros de la Plaza Mayor. Se trata de una calle con forma de L de unos 22 metros de longitud en un primer tramo, 50 metros en el segundo y una anchura de unos 3 metros y medio. A lo largo de esta calle se encuentran los tres locales de ocio nocturno más frecuentados del municipio.

Desde el año 1998 los clientes venían denunciando recurrentemente ante el Ayuntamiento las molestias por ruido causadas por los referidos establecimientos de ocio y las aglomeraciones de jóvenes en torno a dichos locales, vociferando y consumiendo alcohol en la vía pública hasta altas horas de la madrugada. En verano los establecimientos instalan terrazas, barras exteriores y escenarios para actuaciones musicales nocturnas que, además de incrementar el ruido ambiental, obstaculizan el paso de peatones. Por otra parte se incumple reiteradamente el horario de cierre de los establecimientos, prolongándolo hasta el amanecer. Como consecuencia de esto, desde hace años, en las noches de los fines de semana, festivos y los meses de verano, se ha creado una situación intolerable para los vecinos, que han ido abandonando la zona al mismo tiempo que intentan vender sus inmuebles, depreciados por el problema del ruido.

En los informes emitidos por SEPRONA que constan en los autos se evidencia que los locales de ocio desarrollan su actividad sin el debido aislamiento acústico, con puertas y ventanas abiertas, sin disponer de vestíbulo acústico estanco dotado de doble puerta y sin limitador-controlador de potencia operativo, proyectando el ruido interior al exterior.

A pesar de las numerosas denuncias por ruido presentadas por los clientes a lo largo de los años, el Ayuntamiento nunca les respondió y ha permitido que, durante más de veinte años, los establecimientos de ocio

funcionaran sin ningún tipo de control y haciendo dejación de sus competencias en materia ambiental.

Ante esta situación los clientes encomiendan el asunto al despacho de abogados de la autora, que reitera ante el Ayuntamiento las solicitudes de inspección, vigilancia y adopción de medidas correctoras a los establecimientos de hostelería. Una vez transcurrido el plazo sin que el Ayuntamiento responda, entendiéndose que estamos ante una desestimación presunta de la reclamación, se presenta recurso ante el Juzgado de lo Contencioso-Administrativo de Zamora, competente territorialmente para su conocimiento, recayendo en el Juzgado N.º 1.

3. ANÁLISIS DE LOS FUNDAMENTOS JURÍDICOS DEL FALLO DE LA SENTENCIA

3.1. Una vez consignados en el recurso los hechos relevantes y los fundamentos jurídicos, se solicita sentencia que condene al Ayuntamiento a realizar las siguientes actuaciones:

1. La adopción de las medidas correctoras necesarias para impedir las inmisiones por ruido en la vivienda propiedad de los recurrentes procedentes de las actividades de los locales de ocio y de las aglomeraciones en su entorno.
2. El precinto los equipos musicales y altavoces instalados en el interior de uno de los establecimientos con licencia de bar en tanto dicha actividad no disponga de licencia ambiental adaptada a la actividad de pub/bar especial que realiza.
3. Las mediciones necesarias para comprobar que los ruidos procedentes de los equipos musicales instalados en los otros dos establecimientos no superan los límites fijados en el Anexo I de la Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León.

4. Comprobar que el aislamiento acústico a ruido aéreo de los establecimientos cumplen los niveles fijados en el Anexo III de la Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León, así como la obligación de disponer de doble vestíbulo acústico dotado de doble puerta; y a tramitar los expedientes de adopción de medidas correctoras de subsanación de las deficiencias detectadas.
5. Comprobar por los técnicos municipales competentes que el limitador- controlador instalado en los establecimientos se encuentra operativo y cumpliendo las características exigidas en el Anexo VIII de la Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León, controlando su actividad.
6. Intensificar por las Fuerzas de Seguridad competentes la vigilancia en la calle Trasalfóndiga para minimizar las molestias denunciadas, garantizar que no se consuman bebidas alcohólicas en la vía pública, comprobar el horario de cierre de los establecimientos de ocio y el cumplimiento de las condiciones establecidas en las licencias de las actividades, funcionado con puertas y ventanas cerradas y con el limitador-controlador de potencia instalado y operativo.
7. Incoar los procedimientos sancionadores pertinentes contra los titulares de los establecimientos por incumplimiento de las condiciones de las licencias otorgadas, así como a los que dieran lugar los incumplimientos normativos constatados.

Es preciso destacar que se optó en el recurso por la redacción de un suplico muy pormenorizado con la finalidad de que no se frustrara la ejecución de la sentencia al definir de un modo preciso la actuación debida por el Ayuntamiento para considerar cumplido el fallo.

Por su parte, el Ayuntamiento solicitó la desestimación del recurso alegando que ha actuado para controlar la legalidad de las actividades de los establecimientos, reforzando la vigilancia de cumplimiento de horarios y límites de ruido.

3.2 La juzgadora reconoce como hecho probado que la existencia de los locales de ocio en la zona aledaña a la Plaza Mayor ha generado desde hace varios años un problema de aglomeración de gente y, consecuentemente, un aumento del nivel de ruido. Alude a los 60 procedimientos sancionadores abiertos entre el año 2016 a 2018 a uno de los establecimientos por infracción del horario de cierre según la Orden IYJ/689/2010, de 12 de mayo, por la que se determina el horario de los espectáculos públicos y actividades recreativas que se desarrollen en los establecimientos públicos, instalaciones y espacios abiertos de la Comunidad de Castilla y León. Además dicho establecimiento tiene licencia de bar desde abril de 1989 y, a pesar de que solicitó su transformación a bar-especial en enero de 2015, nunca llegó a concederse, sancionándosele además por ejercicio de la actividad de bar-musical sin haber realizado comunicación de inicio conforme al art. 38 del Decreto Legislativo 1/2015, de 12 de noviembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Prevención Ambiental de Castilla y León.

Por otra parte, el Ayuntamiento no había revisado las licencias otorgadas para adecuarlas a la categoría de bar-especial del catálogo de la Ley 7/2006, de 2 de octubre, de espectáculos públicos y actividades recreativas de la Comunidad de Castilla y León, conforme establecía su Disposición Transitoria Cuarta. Tampoco había realizado las inspecciones pertinentes para comprobar los niveles de aislamiento y mediciones en las viviendas colindantes.

En el expediente administrativo únicamente constan las quejas por ruido de los recurrentes durante el año 2020. Así mismo, solo una orden a la Policía Local para que se

inspeccione el horario de cierre de los establecimientos, el funcionamiento de los locales con puertas y ventanas cerradas y del limitador. Si bien constaba una resolución del Procurador del Común, no se había atendido a ninguna de sus recomendaciones pese a haberlas aceptado. Por otra parte, habiéndose requerido a los titulares del establecimiento con licencia de bar la adecuación de la licencia a bar especial, no hay actuación posterior al requerimiento, ni se decretó su cierre. En relación a las terrazas, solo constaba una autorizada. Tampoco constaba que se hubiera incoado expediente alguno al los disco bares por incumplir las licencias municipales al funcionar con las puertas abiertas y sin limitador.

3.3. La sentencia se fundamenta jurídicamente sobre los siguientes reconocimientos:

En primer lugar, el Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana (BOE núm. 261 de 31 de Octubre de 2015) reconoce en su art 5.a) el derecho de los ciudadanos a una “vivienda digna, adecuada y accesible” que constituya su domicilio “libre de ruido u otras inmisiones contaminantes de cualquier tipo que superen los límites máximos admitidos por la legislación aplicable y en un medio ambiente y un paisaje adecuado”. De este modo expresamente el legislador ha incluido, dentro de las exigencias de dignidad y adecuación que el art. 47 de la Constitución considera inherente al derecho a la vivienda, la exigencia de que sea un “domicilio libre de ruidos”. Así lo ha reiterado en numerosas ocasiones el Tribunal Constitucional, en adelante TC, siendo especialmente relevantes sus sentencias 119/2001 y 16/2004. En la primera de ellas se declara : “5. *En relación con el derecho fundamental a la integridad física y moral, este Tribunal ha tenido ocasión de señalar que su ámbito constitucionalmente garantizado protege " la inviolabilidad de la persona, no sólo contra ataques dirigidos a lesionar su cuerpo o espíritu, sino también contra toda clase de*

intervención en esos bienes que carezca del consentimiento de su titular" (SSTC 120/1990, de 27 de junio, FJ 8; 215/1994, de 14 de julio, FJ 4; 35/1996, de 11 de marzo, FJ 3, y 207/1996, de 15 de diciembre, FJ 2). Por lo que se refiere al derecho a la intimidad personal y familiar, hemos declarado reiteradamente que tiene por objeto la protección de un ámbito reservado de la vida de las personas excluido del conocimiento de terceros, sean éstos poderes públicos o particulares, en contra de su voluntad (por todas, SSTC 144/1999, de 22 de julio, FJ 8, y 292/2000, de 30 de noviembre, FJ 6). Igualmente, hemos puesto de relieve que este derecho fundamental se halla estrictamente vinculado a la propia personalidad y deriva, sin ningún género de dudas, de la dignidad de la persona que el art. 10.1 CE reconoce (STC 202/1999, de 8 de noviembre, FJ 2 y las resoluciones allí citadas), e implica "la existencia de un ámbito propio y reservado frente a la acción y el conocimiento de los demás, necesario, según las pautas de nuestra cultura, para mantener una calidad mínima de la vida humana" (STC 186/2000, de 10 de julio, FJ 5).

Así mismo se ha declarado jurisprudencialmente que el “domicilio inviolable” es el espacio en el cual el individuo vive sin estar sujeto necesariamente a los usos y convenciones sociales y donde ejerce su libertad más íntima. El objeto específico de protección en este derecho fundamental es tanto el espacio físico en sí mismo como también lo que en él hay de emanación de la persona que lo habita.

Los derechos referidos han adquirido una dimensión positiva en relación con el libre desarrollo de la personalidad, orientada a su plena efectividad. En efecto, añade el TC, “habida cuenta de que nuestro texto constitucional no consagra derechos meramente teóricos o ilusorios, sino reales y efectivos (STC 12/1994, de 17 de enero, FJ 6), se hace imprescindible asegurar su protección no sólo frente a las injerencias ya mencionadas, sino

también frente a los riesgos que puedan surgir en una sociedad tecnológicamente avanzada. A esta nueva realidad ha sido sensible la jurisprudencia del Tribunal Europeo de Derechos Humanos, como se refleja en las Sentencias de 21 de febrero de 1990, caso Powell y Rayner contra Reino Unido; de 9 de diciembre de 1994, caso López Ostra contra Reino de España, y de 19 de febrero de 1998, caso Guerra y otros contra Italia". Y añade, "el ruido puede llegar a representar un factor psicopatógeno destacado en el seno de nuestra sociedad y una fuente permanente de perturbación de la calidad de vida de los ciudadanos. Así lo acreditan, en particular, las directrices marcadas por la Organización Mundial de la Salud sobre el ruido ambiental, cuyo valor como referencia científica no es preciso resaltar. En ellas se ponen de manifiesto las consecuencias que la exposición prolongada a un nivel elevado de ruidos tienen sobre la salud de las personas (v. gr. deficiencias auditivas, apariciones de dificultades de comprensión oral, perturbación del sueño, neurosis, hipertensión e isquemia), así como sobre su conducta social (en particular, reducción de los comportamientos solidarios e incremento de las tendencias agresivas).

Desde la perspectiva de los derechos fundamentales implicados, respecto al derecho a la integridad física y moral, estima el Constitucional que, cuando la exposición continuada a unos niveles intensos de ruido ponga en grave peligro la salud de las personas, esta situación podrá implicar una vulneración del derecho a la integridad física y moral (art. 15 CE). Respecto a los derechos del art. 18 CE, el art. 8.1 del Convenio Europeo de Derechos Humanos reconoce el derecho de toda persona "al respeto de su vida privada y familiar, de su domicilio y de su correspondencia".

4. CONCLUSIÓN.

Partiendo de un supuesto de contaminación acústica generada por la concentración de establecimientos de ocio y las aglomeraciones nocturnas en torno a ellos en una calle céntrica de un municipio intermedio como Toro (Zamora), problemática extrapolable a otros municipios, la sentencia objeto de análisis condena al Ayuntamiento por la inactividad mantenida durante más de dos décadas. Reiterando la jurisprudencia del TC y del Tribunal Europeo de Derechos Humanos, identifica y define el marco de los derechos fundamentales que pudieran afectarse en estos casos: derecho a la integridad física y moral (art. 15 CE), a la intimidad personal y familiar (art. 18.1) y a la inviolabilidad del domicilio (art. 18.2). Dichos derechos se proyectan en el fallo, condenado al Ayuntamiento a las actuaciones precisas para reordenación legal de la problemática.

El ineludible e inaplazable cuidado de la salud y del medio ambiente requiere disminuir la contaminación acústica y sus manifestaciones de ruidos y vibraciones. Los Ayuntamientos competentes en la materia, no pueden mantenerse inactivos ante el incumplimiento de la legalidad por las actividades de ocio. Han de inspeccionar, controlar, requerir medidas correctoras y sancionar. Sin embargo la realidad obliga a los afectados a acudir a la vía judicial en defensa de sus derechos y de la propia legalidad.

Urge encontrar soluciones al problema dados los derechos e intereses implicados. Por una parte, los vecinos han de poder disfrutar del derecho a un medio ambiente adecuado y a una vivienda libre de inmisiones acústicas que perturben su calidad de vida y descanso. Por otro lado, la hostelería ha de poder desarrollar su actividad ofertando un ocio demandado pero siempre ajustándose al cumplimiento normativo. Por último, los ayuntamientos han de ejercitar con eficacia y eficiencia sus competencias, evitando que los problemas se cronifiquen ante la desesperación de los afectados.

EL REGIMEN JURÍDICO DE LAS ACTIVIDADES RUIDOSAS ANTERIORES A LA LEY 37/2003, DEL RUIDO

Agustín Bocos Muñoz

Abogado del Ilustre Colegio de Abogados de Valladolid

RESUMEN

Uno de los aspectos más conflictivos de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, es la aplicación de la misma y de su normativa de desarrollo a las actividades implantadas con anterioridad a su entrada en vigor.

La disposición transitoria primera de dicha ley establece que los emisores acústicos existentes en la fecha de su entrada en vigor deberán adaptarse a la misma antes del 30 de octubre de 2007.

El Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, regula los valores límites para las actividades nuevas, que se definen como las que inicien la tramitación de actuaciones de intervención administrativa con posterioridad a su entrada en vigor, en virtud de su disposición adicional segunda.

Este régimen transitorio plantea numerosas cuestiones en su aplicación, que vamos a tratar de analizar en nuestro artículo, especialmente el régimen aplicable a los emisores acústicos antiguos que se encuentran en una zona cuyo objetivo de calidad es superior en 5 decibelios al de la zona colindante, ya que el anexo V del Real Decreto exige que por la Administración se estudie una transición, lo que lamentablemente no suele cumplirse.

ABSTRACT

One of the most conflictive aspects of Law 37/2003, of November 17, on Noise, is the application of it and its implementing regulations to activities implemented prior to its entry into force.

The first transitional provision of said law establishes that existing acoustic emitters on the date of its entry into force must adapt to it before October 30, 2007.

Royal Decree 1367/2007, of October 19, regulates the limit values for new activities, which are defined as those that begin the processing of administrative intervention actions after its entry into force, by virtue of its second additional provision.

This transitional regime raises numerous questions in its application, which we will try to analyze in our article, especially the regime applicable to old acoustic emitters that are located in an area whose quality objective is 5 decibels higher than that of the adjacent area, since Annex V of the Royal Decree requires that the Administration study a transition, which unfortunately is not usually fulfilled.

Palabras Clave: ruido, límites, sanción, area acústica, compatibilidad, zona de transición, objetivos de calidad, planes zonales, servidumbre acústica, fuera de ordenación, inmisiones, preexistencia, daños.

I. ÁMBITO ADMINISTRATIVO

La jurisprudencia contenciosa estudiada en aplicación de las referidas disposiciones transitorias considera que tanto la Ley 37/2003 como el Real Decreto 1367/2007 son perfectamente aplicables a los emisores acústicos anteriores a su entrada en vigor, debiendo adaptarse a dicha normativa mediante la renovación de sus licencias y autorizaciones administrativas, conforme al artículo 18 de la Ley.

Este postulado no obstante tiene importantes singularidades para el procedimiento sancionador por el principio restrictivo que debe inspirar su régimen.

De este modo los tribunales vienen considerando que a estos efectos el límite aplicable será el del recinto emisor en lugar del receptor, como es la norma general. Lo que implica que, a modo de ejemplo, si nos encontramos con una fábrica situada en un área industrial colindante con otro residencial, los límites a aplicar serán los del área industrial, obviamente superiores a los del residencial.

Se exige además en este ámbito la previa determinación por la Administración competente del uso predominante o característico del suelo (STSJ LA RIOJA 28/03/2019). Es decir, se considera que la Administración no puede imponer una sanción cuando no ha cumplido la obligación legal de zonificación acústica que le impone el artículo 5 del Real Decreto 1367/2007.

La adaptación a los nuevos límites debe hacerse además por la Administración de forma gradual, mediante la reducción progresiva de los valores de inmisión, hasta alcanzar el objetivo de calidad fijado en cada área acústica, mediante la aplicación de los planes zonales específicos previstos en el art. 25.3 de la Ley del Ruido.

Debe considerarse además que la Administración está obligada a estudiar una zona de transición entre áreas acústicas colindantes cuando la diferencia entre los objetivos de calidad de ambas áreas supere los 5 dB(A), según el anexo V.2.d del Real Decreto 1367/2007. Lo que en la práctica implica que la Administración no puede imponer una sanción al titular de un foco emisor cuando no ha previsto una zona de transición entre áreas con la diferencia de objetivos acústicos referida, para lo que tendrá que prever una reducción progresiva de los índices acústicos en el área más ruidosa mediante la implantación de medidas de aislamiento, por ejemplo, de paneles acústicos.

En palabras del Tribunal Supremo (STS 20/07/2010) *“debe exigirse el mantenimiento de una cierta compatibilidad entre áreas contiguas,*

que vendrá definido por los objetivos de calidad fijados para cada una de ellas. Si bien las modificaciones y revisiones del planeamiento urbanístico que puedan llevarse a cabo abren la posibilidad de modificar la calificación de las áreas acústicas incluidas en el ámbito correspondiente”

Así como la sentencia de 15 de enero de 2020 del Alto Tribunal:

“Se trata, el de la gestión urbanística, de un proceso, además de complejo, necesitado de una flexible transitoriedad, en el que también han de tomarse en consideración las colindancias físicas actuales mediante una adecuada programación de actuación, como bien reconoce la sentencia de instancia, pero tal gestión no puede implicar paralización absoluta.”

Las consecuencias del incumplimiento por la Administración de este deber de compatibilidad, bastante frecuente por desgracia, son la imposibilidad de sancionar o limitar la actividad de los emisores acústicos que superan los límites del área receptora siempre que cumplan los valores límite de su área acústica.

En lo referente al resto de normativa acústica introducida o anunciada por la Ley 37/2003, resulta plenamente aplicable sea cual sea la antigüedad del foco acústico, especialmente las medidas protectoras frente al ruido, como dice el reciente Auto del 13/07/2023 del Juzgado de lo Contencioso Administrativo nº 1 de Toledo:

“De todo lo anterior tenemos que lo que, conforme a la normativa del ruido se puede suspender son los objetivos de calidad acústica (art. 9 L 37/2003), no los derechos fundamentales a mantener un espacio habitable durante el conjunto de los días del año, recordando que no estamos ante un lugar que tenga, ni pueda por estas razones tener, una servidumbre acústica (art. 7 RD 1367/2007) y siendo los valores que arrojan los estudios aportados superiores a los establecidos en la clasificación del anexo II del mencionado reglamento de la ley del ruido conforme a las conclusiones del estudio que se aporta junto con la instancia, lo que justifica indiciariamente el perjuicio irreparable que se

señala, pues afecta de manera irremediable a la vida familiar y a la salud por perjudicar el descanso.”

II. ÁMBITO CIVIL

Desde el punto de vista civil, resulta igualmente plenamente aplicable la normativa acústica referida, partiendo del principio de garantizar la máxima protección a los derechos fundamentales de las personas, pero hemos de considerar que según reiterada jurisprudencia, los límites administrativos no son vinculantes a efectos civiles sino una mera referencia ya que lo determinante es la superación de los valores de tolerabilidad o uso razonable del derecho, desde la perspectiva de las relaciones de vecindad, considerando que la propiedad se presume libre. De modo que puede considerarse contraria a los principios civiles una inmisión acústica pese a no superar los límites administrativos y, al contrario, puede considerarse conforme con estos principios, una inmisión que supere tales límites.

Así lo viene considerando el Tribunal Supremo desde su sentencia del 04/03/1992 y lo viene aplicando reiteradamente la jurisprudencia. En palabras de la Audiencia Provincial de Palencia (SAP 07/11/2019): *“Conforme a la jurisprudencia civil, la inmisión se produce, no solo cuando se contraviene una norma administrativa o se superan un número de decibelios, sino cuando se acredita que se ha producido una molestia a alguien que no estaba obligado a soportarla, lo que, sin duda, ha sido el caso.”*

Es decir, para la valoración de la gravedad de la inmisión acústica deben de considerarse todos los factores que hayan podido influir en el caso concreto, tanto objetivos como subjetivos, donde puede incluirse la reiteración en el tiempo, el horario, la afección al sujeto receptor o la incidencia en terceros.

La Sentencia de la Audiencia Provincial de León del 22/12/2020 dice al respecto: *“... para valorar la inmisión acústica habrá de estarse a la naturaleza y origen del sonido o molestia, a su*

intensidad, a la persistencia del mismo, a su habituabilidad o frecuencia, a su horario, a la coyuntura del lugar y tiempo en que se produzca la inmisión, y a las propias circunstancias de la actividad molesta.”

Por lo que se refiere al concepto de “actividades e infraestructuras nuevas” previstas en la disposición adicional segunda del Real Decreto 1367/2007, cuyos límites están regulados en el artículo 24 y tabla B.1 y B.2 del anexo III del mismo, la interpretación que se ha dado por los tribunales ha sido más amplia que la que pueda derivarse de la dicción literal del artículo 18 de la Ley 37/2003, comprendiendo no sólo aquellos emisores acústicos que inicien su tramitación administrativa con posterioridad a su entrada en vigor sino también los que resulten de una situación nueva, como puede ser la edificación de viviendas en el entorno del emisor acústico, según Sentencia de la Audiencia Provincial de Navarra del 13/05/2021.

El supuesto de esta sentencia se planteó como consecuencia de los daños y perjuicios causados por los ruidos de una industria a los propietarios de las viviendas vecinas. Aunque la actividad era anterior a la Ley 37/2003 y a la construcción de las propias viviendas, el Tribunal la consideró como actividad nueva, siéndole por tanto aplicables los límites del anexo III del Real Decreto 1367/2007, si bien referentes al suelo industrial, debido a la construcción y posterior ocupación en las inmediaciones de la actividad de las viviendas donde se transmitían los ruidos. La consecuencia fue la condena al titular de la industria a aislar su actividad de manera que no se transmitan ruidos a las viviendas por encima de los límites legales además de tener que indemnizar los daños y perjuicios causados a los vecinos.

El carácter meramente referencial de la normativa administrativa en las relaciones de vecindad conlleva el que tampoco se considere determinante por la jurisprudencia estudiada, a efectos civiles, la existencia de ciertos requisitos legales, como una servidumbre acústica en la zona donde se produce la inmisión, conforme establece

el artículo 10 de la Ley 37/2003, pues se trata de una limitación administrativa ajena a la problemática civil. No se rompería por tanto la relación de causalidad con las consecuencias dañosas del ruido.

Del mismo modo se considera irrelevante a estos efectos el incumplimiento por la Administración de su obligación de estudio de una zona de transición entre áreas acústicas con objetivos de calidad acústica con diferencias superiores a los 5 dB(A), en contra de la normativa referida.

Otro de los factores que se han pretendido utilizar para desestimar una acción civil de inmisiones ha sido la preexistencia del foco emisor. Es decir, el hecho de que el foco emisor estuviera instalado con anterioridad al fondo receptor, cuestión bastante habitual en los emisores anteriores a la Ley 37/2003. En palabras del Tribunal Superior de Justicia de Navarra (13/05/2021) *“la aplicación de la prioridad en el uso a las relaciones de vecindad y a las inmisiones impondría a los propietarios de las fincas del entorno una permanente limitación en el disfrute de sus propiedades, despojándoles de ciertas utilidades sin la debida compensación.”*

De modo que todos estos factores carecen de entidad para la ruptura del nexo causal entre la emisión de ruido intolerable y el daño moral sufrido por el receptor.

Tampoco se considera determinante a estos efectos el deficiente aislamiento acústico del recinto receptor, lamentablemente habitual en muchas edificaciones de nuestro país, argumento inaceptable para muchas sentencias por considerar que el daño originado por el agresor se consideraría imputable al agredido.

Otro de los elementos cuestionados ha sido la inmisión causada a viviendas que carecen de los requisitos legales, es decir que se encuentran en situación irregular desde el punto de vista urbanístico por encontrarse fuera de ordenación o carecer de las licencias correspondientes. Se trata también de una cuestión bastante habitual, vinculada igualmente a emisores acústicos anteriores a la Ley 37/2003 y

que ha sido resuelta por los tribunales en el sentido de que no le serían aplicables los límites de inmisión para una zona residencial del anexo III del RD (45-55 dBA) sino los objetivos de calidad que establece el anexo II.

Del mismo modo tampoco se ha estimado la petición de indemnización por daños morales o pérdida de valor por inmisiones acústicas transmitidas a viviendas fuera de ordenación (STS 12/01/2011).

III. CONCLUSIONES

A la luz de la legislación y jurisprudencia analizadas, hemos de concluir que, al objeto de proteger adecuadamente la salud y el medio ambiente, en la actualidad todos los emisores acústicos existentes deben estar adaptados a la Ley 37/2003 así como a su normativa de desarrollo, tanto estatal como autonómica y local, salvo a efectos del procedimiento sancionador en el que se deber considerar el límite del area emisora y se exige la previa determinación por la Administración del uso predominante o característico del suelo así como la consideración de una zona de transición entre áreas acústicas con objetivos de calidad con una diferencia superior a los 5 dB(A), debiendo adaptarse a los límites legales de forma progresiva mediante planes zonales específicos.

Para la jurisdicción civil, sin embargo, la normativa administrativa es una mera referencia no vinculante, considerando siempre la normativa más protectora para los derechos particulares afectados por el ruido así como los factores que puedan incidir en la intensidad de la inmisión, no siendo factores que rompan la relación de causalidad la preexistencia del foco emisor al receptor, el deficiente aislamiento acústico del receptor ni el incumplimiento de la normativa administrativa. Lo que se trata de proteger, en definitiva, son los derechos fundamentales de los ciudadanos a la salud, intimidad e inviolabilidad del domicilio, como dice la exposición de motivos de la Ley 37/2003.



EL RUIDO PROCEDENTE DE TERRAZAS Y VELADORES

María Dolores Muñoz Perales

Abogada. Ilustre Colegio de Abogados de Jaén.

RESUMEN

Las terrazas y veladores han proliferado en los últimos años, provocando serios problemas a las personas en sus viviendas, que viven afectadas por el ruido que genera la concentración de personas.

Estos elementos implican la ocupación de la vía pública por gente y mobiliario que pertenece a una actividad privada. Los entes locales deben conceder a los establecimientos de ocio una licencia municipal que permita la ocupación de la vía pública y que no sea perjudicial.

Las Administraciones públicas deben servir con objetividad los intereses generales y actuar de acuerdo con los principios de eficacia, jerarquía, descentralización, desconcentración y coordinación, con sometimiento pleno a la Constitución, a la Ley y al Derecho. Deberán respetar en su actuación los principios de buena fe y de confianza legítima, cumplir con criterios de eficiencia y servicio a los ciudadanos, además están obligadas a actuar de conformidad con los principios de transparencia y de participación.

ABSTRACTO.

Terraces and pedestal tables have proliferated in recent years, causing serious problems for people in their homes, who are affected by the noise generated by the concentration of people.

These elements imply the occupation of public roads by people and furniture that belong to a private activity. Local authorities must grant leisure establishments a municipal license that allows the occupation of public roads and that is not harmful.

Public Administrations must objectively serve the general interests and act in accordance with the principles of effectiveness, hierarchy, decentralization, deconcentration and coordination, with full submission to the Constitution,

the Law and the Law. In their actions, they must respect the principles of good faith and legitimate trust, comply with criteria of efficiency and service to citizens, and are also obliged to act in accordance with the principles of transparency and participation.

Palabras Clave: Ruido, Terrazas, Veladores, Derechos Fundamentales.

1. INTRODUCCIÓN

Las terrazas y veladores han proliferado en los últimos años. Siendo un elemento habitual las terrazas en localidades turísticas, tras la pandemia de la Covid-19 se ha transformado el paisaje de nuestras ciudades y cualquier espacio público ha sido ocupado por mesas y sillas.

2. JURIDICAMENTE ¿QUÉ ES UNA TERRAZA?

El empresario que decide instalar una terraza lo que está haciendo es modificar por ampliación la licencia de actividad que tiene concedida, ampliando así su espacio empresarial o comercial de lucro privativo a costa de un espacio público (aceras, aparcamientos, jardines..).

Es obvio que esta modificación por ampliación altera sustancialmente la licencia de actividad inicial concedida que, sorprendentemente, no se ve afectada por la nueva solicitud de ampliación y ello a pesar del efecto aditivo de ruido que la terraza tendrá sobre la primigenia actividad.

Y es obvia repercusión de la ampliación de la licencia tanto a los vecinos como al medioambiente.

No olvidemos que una terraza es una actividad contaminante.

3. REQUISITOS DE OBTENCIÓN DE LICENCIA DE ACTIVIDAD PARA TERRAZA

Reviso una página web de un Ayuntamiento cualquiera como es Sevilla, ejemplo claro e indubitado del problema enquistado que son los perjuicios causados por el ruido de las terrazas a los vecinos de barrios residenciales. Entro a explorar el contenido de la solicitud para instalar una terraza. La resolución admitiendo la licencia depende exclusivamente de “estar al corriente de las obligaciones económicas, análisis de la petición y resolución”. Esto no es un exceso de la autora, así lo detalla textualmente la página web [1]:

“Se crea expediente administrativo. Se comprueba si la documentación presentada es correcta, completa y coherente. Si falta documentación se requiere al titular para su presentación en el plazo de diez días. Cuando la documentación es completa se comprueba si el establecimiento está al corriente del pago de las obligaciones económicas con el Ayuntamiento (basuras, tasas, multas disciplinarias). Si no hay deudas se analiza la petición conforme a la Ordenanza de Terrazas de Veladores y se dicta Resolución que puede ser favorable a la instalación de la terraza o desfavorable. Se notifica al solicitante la Resolución. Si es favorable, se le hace entrega del plano de autorización de la Terraza para que sea colocado en el local a la vista del público. Deberá abonar la tasa correspondiente por la ocupación de la vía pública con mesas y veladores en función de su número y de la categoría asignada a la calle donde se ubique la terraza”.

Cualquier ciudadano medio piensa que en la documentación a presentar habrá como requisito un estudio acústico serio que proteja los Derechos Fundamentales de los Vecinos.

Dice el Segundo paso: documentación a presentar:

.- Modelo 62, debidamente cumplimentado (modelo normalizado de solicitud de licencia que recoge lo que a continuación se expone):

.- Datos relativos al alta en la tasa de basuras del establecimiento (Apellidos y Nombre/Razón Social, DNI/NIF)

.- Fotocopia de la Licencia o Declaración Responsable de actividad a nombre del solicitante. Se deberá acreditar el aforo del establecimiento. En caso de que en la cartulina de la licencia de actividad no figure el aforo, deberá presentar un certificado de aforo suscrito por un técnico.

.- Plano de situación a escala.

.- Relación de elementos de mobiliario que se pretende instalar, con indicación expresa de su número, modelo y dimensiones.

.- Plano de detalle a escala suficiente que refleje:

.- La acera con delimitación de su ancho y los elementos de mobiliario urbano sobre ella.

.- La superficie a ocupar por la instalación de los módulos de mobiliario correspondiente, indicando el nº de elementos, clase y dimensiones.

.- Fotografías de la fachada del local para el que se solicita, de los locales colindantes y del modelo de los elementos que se pretenda colocar.

.- En caso de heladería, confitería o similar, copia del proyecto que recoja la existencia de aseos con su distribución.

.- Copia de la póliza de seguro con extensión de cobertura para cubrir los riesgos de la instalación de terraza de veladores y de sus elementos. Si la instalación cuenta con elementos calefactores, deben venir expresamente recogidos en la póliza de seguros.

- En caso de transmisión de licencia o declaración responsable de apertura, deberá aportar copia de la misma.

- Permiso del titular del local colindante en caso de que la instalación solicitada se exceda de la fachada del establecimiento.

- Si se pretenden instalar elementos de sombra, toldos, se deberá aportar documentación suscrita por técnico competente, en la que se deben garantizar la estabilidad y el cumplimiento de la normativa de aplicación respecto de la resistencia al fuego de la lona. Debiéndose justificar asimismo el cumplimiento de lo dispuesto en la Ordenanza para este tipo de instalaciones.

Fuente: urbanismosevilla.org/areas/ordenacion-via-publica

4.- ¿TIENEN DERECHOS LOS PARTICULARES AFECTADOS POR LAS INMISIONES CAUSADAS POR LAS TERRAZAS?

Algo que sorprende a quien redacta este artículo es la poca salvaguarda que los entes públicos en sus ordenanzas hacen de los derechos de los particulares. Sí he podido observar a cargos públicos, en sus intervenciones, pedir a los usuarios de las terrazas mantener “conversaciones no subidas de tono para no molestar”, volcando su responsabilidad en otras personas.

Lo primero que piensa alguien que lee este artículo y ha llegado hasta aquí es que los vecinos de la actividad carecen de derechos en tanto en cuanto la administración los omite, no hace referencia alguna a los mismos en los expedientes de concesión de licencias ni tampoco menciona los posibles perjuicios que la terraza pueda causar a los particulares.

Sin embargo los derechos de los particulares se encuentran en la Constitución, concretamente en la Sección

Primera del Capítulo Segundo del Título I, artículos 15 a 29. Estos derechos son (entre otros):

- Derecho a la vida y a la integridad física y moral

- A la libertad y a la seguridad.

- Al honor, a la intimidad personal y familiar, así como a la propia imagen.

- A la libertad de residencia y de circulación.

La página [2] conceptosjuridicos.com recoge una definición de Derechos Fundamentales: Este tipo de derechos tienen un valor jurídico superior a los demás recogidos en el ordenamiento jurídico, al ser inherentes a la dignidad humana.

De acuerdo con la jurisprudencia del Tribunal Constitucional, no solo protegen a las personas de una posible arbitrariedad de terceros o del Estado, sino que también les otorga el poder de exigir a los poderes públicos las medidas adecuadas para su defensa.

5.- ¿PORQUÉ MOTIVO LOS PODERES PÚBLICOS NO PROTEGEN A LAS VÍCTIMAS?

El Defensor del Pueblo Andaluz muestra en sus Resoluciones [3], dignas de lectura y estudio, algunos casos en los que el Ayuntamiento, requerido por sus incumplimientos en materia medioambiental, manifiesta sin pudor en el expediente tolerar durante años de molestias y quejas vecinales generados por la existencia de una terraza no autorizada en un establecimiento que cuenta con expedientes sancionadores previos. Alega el Ayuntamiento en el expediente:

“Que la vigente ordenanza fiscal reguladora de la tasa por utilización privativa o aprovechamiento especial del dominio público publicada en el BOP n.º 298 de 28 de diciembre de 2017 ha eliminado la tipificación como

infracción de la utilización o aprovechamiento del dominio público local sin estar amparado en la correspondiente autorización, así como la determinación de sanciones.

Y por tanto la ausencia de normativa que tipifique la infracción y concrete la sanción aplicable, impide incoar procedimientos sancionadores sobre la instalación de veladores en el dominio público sin licencia”.

En vista de estos informes, se hace preciso hacer las siguientes CONSIDERACIONES: Esta Institución no puede sino mostrar sorpresa ante el reconocimiento expreso de que en la Ordenanza fiscal correspondiente se haya “eliminado la tipificación como infracción de la utilización o aprovechamiento del dominio público local sin estar amparado en la correspondiente autorización, así como la determinación de sanciones”. Ciertamente la Ley 7/1999, de 29 de septiembre, Reguladora de los Bienes de las Entidades Locales de Andalucía (LBELA) establece en su artículo 77.1 a) que «Serán sancionables en las ordenanzas locales las infracciones que supongan: a) Ocupar bienes sin título habilitante.»

Sin embargo, no se entiende bien cuál es la razón de eliminar tal infracción de la Ordenanza, pues no se nos dice, dado que ello supone permitir un escenario jurídico a partir del cual quedarán impunes conductas jurídicamente reprochables, no solo por lo que tiene de ocupación sin título de un espacio público, sino por lo que implica en términos de igualdad y competencia frente a titulares de establecimientos que sí abonan las tasas correspondientes por sus terrazas de veladores, y por último -y la razón de ser de esta queja- porque es el vehículo para la comisión de infracciones con incidencia acústica y con menoscabo de los derechos de terceras personas. Ello, por mucho que se quiera compensar esta situación con el hecho de que esté en trámite de información pública una nueva Ordenanza que sí contempla este supuesto como infracción administrativa.

Por otra parte, tampoco se nos facilita el dato de cuándo se produjo esa eliminación de la Ordenanza vigente de la infracción que nos ocupa, tiempo durante el cual se ha permitido una desigualdad de trato entre establecimientos,

impropia de una Administración Pública de este tiempo, e impropia de un mínimo estándar de buena administración y de responsabilidad en la administración y gestión de los bienes públicos.

Esta situación necesariamente lleva a invocar el derecho a una buena administración del artículo 31 del Estatuto de Autonomía para Andalucía (EAA), aprobado por Ley Orgánica 2/2007, de 19 de marzo, que se ve incumplido a nuestro juicio, y que lleva también a provocar un incumplimiento del derecho a la igualdad del artículo 14 de la Constitución (CE), en relación con el artículo 9.2 primer inciso de la Carta Magna que dice que «Corresponde a los poderes públicos promover las condiciones para que la libertad y la igualdad del individuo y de los grupos en que se integra sean reales y efectivas».

Además, esta sorprendente circunstancia de la que se nos informa, constituye la vulneración de los principios a los que debe someterse toda Administración Pública en su actuación, en especial los principios de eficacia, servir con objetividad los intereses generales, sometimiento pleno a la Constitución, a la Ley y al Derecho, servicio efectivo a los ciudadanos, buena fe y confianza legítima, responsabilidad por la gestión pública, previstos en los artículos 9.3 y 103.1 de la CE, 3 de la Ley 40/2015, de 1 de octubre, de Régimen Jurídico del Sector Público (LRJSP) y 6 de la Ley 7/1985, de 2 de abril, reguladora de las Bases del Régimen Local (LBRL).

Y por si todo ello no es grave, estos incumplimientos, que pueden incluso calificarse como alejados del buen gobierno, son el escenario perfecto para situaciones de irregularidad cometidas por particulares que a su vez redundan en la vulneración de derechos de terceras personas, como es el caso de la reclamante en esta queja, que pide que se respete su derecho al descanso, el cual no puede ejercer por el ruido que genera la disposición sin licencia de la terraza de veladores del bar que está justo bajo su vivienda.

Si todo esto sorprende, más lo hace que se dé por hecho que poco o nada se puede hacer hasta que no entre en

vigor la nueva Ordenanza, lo cual no se sabe cuándo podrá acontecer. Sin embargo, ciertamente no se podrá sancionar esta conducta por no estar tipificada como tal en la Ordenanza vigente, pero ello no impide de ningún modo que ese Ayuntamiento, ante la constatación de que se está disponiendo del espacio público sin licencia, pueda evitar tal situación mediante la retirada de la terraza de veladores del establecimiento denunciado, logrando con ello dos objetivos: primero, impidiendo un uso gratuito del espacio público y defendiendo indirectamente a los hosteleros que sí tienen licencia y pagan las tasas correspondientes; segundo, evitando que a través de esas instalaciones se generen los ruidos que se denuncian, que es el origen de la queja que en su momento se nos presentó.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que del establecimiento objeto de queja se nos ha informado que pertenece a “Establecimientos Especiales de Categoría con música”, por lo que en relación con la terraza de veladores se estará a lo dispuesto en lo establecido en el artículo 11 del Decreto 155/2018 de 31 de Julio”.

Pues bien, este establecimiento no solo no tiene la obligatoria licencia sino que lo más probable es que se ubique en una zona de uso residencial predominante, por lo que resultará muy difícil motivar para una actividad con música el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica en los términos del artículo 11.2 antes reproducido.

En consecuencia con todo lo anterior, tratándose de una instalación que precisa obligatoriamente de licencia, la cual no tiene, que además no cumple las exigencias para que pueda concedérsele al tratarse de un bar con música en suelo de uso predominante residencial, debe ese Ayuntamiento adoptar cuanto antes las medidas para la retirada de esta terraza de veladores, llegando si fuera necesario a la ejecución forzosa. No debe olvidarse, en este sentido, que se trata de una conducta que está generando ruidos y que puede estar vulnerando el derecho al descanso de la reclamante y de otras personas, además de originando un escenario de desigualdad frente a hosteleros que cumplen la normativa, esto es, que solo tienen terraza de veladores previa licencia

y que pagan las tasas correspondientes por ello, y frente a hosteleros que no pudiendo tener terraza de veladores, no disponen de ellas ilegalmente.

En consecuencia con todo lo expuesto y al amparo de lo establecido en el artículo 29 de la Ley 9/1983, de 1 de diciembre, del Defensor del Pueblo Andaluz, se formula la siguiente RESOLUCIÓN

RECORDATORIO 1 del derecho a la igualdad del artículo 14 de la CE, en relación con el artículo 9.2 primer inciso de la Carta Magna que dice que «Corresponde a los poderes públicos promover las condiciones para que la libertad y la igualdad del individuo y de los grupos en que se integra sean reales y efectivas», así como del derecho a una buena administración del artículo 31 del EAA, y de los principios a los que debe someterse toda Administración Pública en su actuación, en especial los principios de eficacia, servir con objetividad los intereses generales, sometimiento pleno a la Constitución, a la Ley y al Derecho, servicio efectivo a los ciudadanos, buena fe y confianza legítima, responsabilidad por la gestión pública, previstos en los artículos 9.3 y 103.1 de la CE, 3 de la LRJSP y 6 de la LBRL.

RECORDATORIO 2 de que conforme al artículo 11 del Decreto 155/2018, en relación con la LBELA, la instalación de terrazas y veladores en la vía pública y en otras zonas de dominio público, destinados exclusivamente a la consumición de bebidas y comidas, anexos o accesorios a establecimientos públicos de hostelería, estará obligatoriamente sujeta a licencia municipal, y se ubicarán, de conformidad con la normativa de protección acústica, preferentemente en áreas no declaradas zonas acústicas especiales y que además sean sectores con predominio de suelo de uso recreativo, de espectáculos, característico turístico o de otro uso terciario no previsto en el anterior, e industrial.

RECOMENDACIÓN para que, sin más demoras ni retrasos injustificados, se proceda previos los trámites legales que sean preceptivos, a la retirada de la terraza de veladores del establecimiento objeto de queja.

SUGERENCIA para que se agilice en todo lo posible la aprobación de la nueva Ordenanza que evite la impunidad de conductas contrarias a la normativa que además son generadoras de ruidos y contrarias a la igualdad que deben fomentar las Administraciones Públicas”.

Al inicio de este estudio resalté el cambio sufrido en el paisaje de la inmensa mayoría de las ciudades que, tras la Covid-19, adoptaron medidas permisivas con las terrazas que las adoptaron medidas sin tener en cuenta reclamaciones de vecinos afectados ni los perjuicios y derechos de los particulares.

Las autorizaciones masivas que revistieron forma de Ordenanzas para favorecer la instalación de terrazas autorizando emisiones de música al exterior de hasta 80 DBa (ampliando los límites máximos permitidos en 20 y 30 DBa según sea horario nocturno o diurno), ampliación del espacio concedido y ampliación del horario de apertura.

Tales autorizaciones vulneran la Constitución y la Ley del Ruido al ser las Ordenanzas mucho más permisivas que estas normas de rango superior y que deben regular su marco de aplicación.

Estas autorizaciones sin más llevaron a Don Antonio Peidró Cuadros (Ingeniero Industrial) [4] a preguntarse en un artículo -tras la publicación en el Boja el día 27 de mayo de 2.020 del Decreto Ley 14/2.020 de la Junta de Andalucía “Como siempre el ruido, ese problema del medio ambiente que está en la mitad del medio que no importa a nadie, y como siempre, quien se queje es un egoísta insolidario... ¿Acaso no sería de esperar que subieran los límites de alcohol al volante y se retiraran controles a fin de facilitar el consumo de alcohol en bares y restaurantes? ¿Porqué no?. Si se desprecia sin rubor la Ley del Ruido porqué no despreciar también la Ley de Seguridad Vial”.

6.- HAY SOLUCIÓN. CONCLUSIÓN

Podríamos pensar que los derechos económicos se protegen más que los derechos fundamentales de los afectados,

ejemplo claro de lo expuesto hasta el momento. Las administraciones vulneran sus principios y obligaciones favoreciendo al empresario sin buscar un equilibrio con el ciudadano que sufre las consecuencias de la actividad contaminante.

“Nuestras ciudades [5] no pueden albergar espacios ilimitados de terrazas de establecimientos de ocio y restauración, pues son emisores acústicos, focos de ruido altamente contaminantes, que pueden alcanzar niveles más elevados que el de zonas industriales.

Es preciso que todos los municipios cuenten con buenas ordenanzas reguladoras de terrazas y de ocupación del dominio público y que contemplen tanto los requisitos técnicos que deben exigirse a los solicitantes para instalarlas, como la necesidad de emitir informes previos de afección por ruido ambiental, saturación... No es suficiente con una Declaración Responsable.

Es preciso que se tenga en cuenta y respete la distancia a fachadas, vías de evacuación, etc. Y ello con el fin de garantizar que la decisión sobre las autorizaciones que se otorguen no afectarán a la salud y derechos fundamentales de terceros.

Mas importante aún es que se apliquen y se cumplan las vigentes normas de protección contra el ruido, entre otras.

Debe existir un efectivo control del cumplimiento de las normas por la actividad contaminante. La administración debe realizar, con diligencia, un seguimiento y en su caso sancionar y clausurar, asumiendo las competencias que tienen asignadas.

Las terrazas han de respetar los itinerarios peatonales accesibles. Además de la contaminación acústica, la extensión de las mismas está llegando a un límite en el que se están produciendo situaciones de riesgo, especialmente en calles estrechas, no pueden pasar las personas en silla de ruedas o con problemas de movilidad, carritos de bebés, invidentes, ambulancias o simplemente los peatones, impidiéndose el acceso a portales y viviendas,

e incluso bloqueando fachadas y accesos de otros negocios y actividades.

Deben limitarse los horarios y aforos con el fin de no perjudicar el descanso de los vecinos y sus Derechos Fundamentales a la salud, a un medio ambiente adecuado, a la integridad física, a la inviolabilidad del domicilio y a la intimidad en el hogar.

Las terrazas no pueden ser una extensión de la actividad con más aforo que el local. Esta situación es más clamorosa cuando se detecta un conjunto consecutivo y agrupado de terrazas, una detrás de otra, o si se trata de zonas de protección acústica especial o de las denominadas zonas saturadas.

Soportar una fuente de ruido como el de las terrazas diariamente y durante horas provoca daños importantes en la salud, tanto auditivos como no auditivos (aumento de la tensión arterial, gastritis, estrés, insomnio, depresión, agravación de enfermedades preexistentes, cambios hormonales, demencia, afecta a las relaciones familiares y laborales, baja el rendimiento, no permite concentrarse ni estudiar o trabajar, y deprecia el valor de los inmuebles).

En ningún caso deben autorizarse equipos de música, amplificadores, televisores, o actuaciones musicales en las terrazas próximas a viviendas.

Las terrazas, sobre todo si se acumulan varias en una misma zona urbana, suelen atraer con frecuencia a ese espacio, otros efectos aditivos y acumulativos, como botellones o grupos de personas que consumen sus propias bebidas y otras sustancias nocivas, suciedad, olores, humos.

Las labores de instalación y la posterior retirada o recogida del mobiliario de la terraza, generan un ruido muy molesto a los residentes en viviendas, y más aún a altas horas de la noche y madrugada.

Debe analizarse cada caso concreto. Es necesario el uso de toldos, paneles, materiales y pavimentos absorbentes, así como sillas y mesas que no sean ruidosas. Es preciso

formar y concienciar al personal de hostelería para manipularlas evitando hacer ruidos.

Poder abrir las ventanas de las viviendas constituye una necesidad (calor, ventilación). No es un capricho o un lujo. Ubicar terrazas y veladores bajo viviendas limita e impide esta necesidad.

Es fundamental que los profesionales de la hostelería tomen conciencia de que el ruido enferma gravemente a los que lo sufren, y que tengan una efectiva y real voluntad para mejorar esta situación en la parte que les concierne.

Es claro que hay usos incompatibles con zonas residenciales y que sólo cumpliendo las normas y ubicando a distancia las terrazas de las viviendas se pueden respetar los Derechos Fundamentales de los afectados”.

[1] urbanismosevilla.org/areas/ordenacion-via-publica

[2] conceptosjuridicos.com “Derechos Fundamentales. Qué derechos se consideran fundamentales en la Constitución española?”.

[3] Defensor del Pueblo Andaluz. “Resolución 18/5602 dirigida al Ayuntamiento de Alcalá de Guadaíra (Sevilla)”.

[4] Don Antonio Peidró Cuadros. Ingeniero Industrial. Artículo “¿Estará la Junta de Andalucía barajando la posibilidad de subir el límite de alcohol al volante y retirar el 90% de los controles?”.

[5] Juristas Contra el Ruido. Artículo “Stop a las Terrazas Ruidosas”.



FIESTAS POPULARES. ANÁLISIS DE LA SENTENCIA DE 18 DE MAYO DE 2023, DE LA SECCIÓN SEGUNDA DEL TRIBUNAL SUPERIOR DE JUSTICIA DE CANARIAS, SOBRE EL CARNAVAL DE DÍA DE VEGUETA.

Yomara García Viera

Abogada .Ilustre Colegio de Abogados de Las Palmas de Gran Canaria.

RESUMEN

Analizaré la sentencia de 18 de mayo de 2023, que ORDENA al Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria a que la celebración del denominado Carnaval de día que se desarrolla en Vegueta, se traslade a un lugar donde no se alteren las condiciones de vida de los vecinos, y al abono de una indemnización de 2000€ a cada reclamante por daño moral. Los promotores de estas fiestas y eventos invocan el artículo 9 de la Ley 37/2003.

Desmenuzaremos distintas cuestiones: ¿Dicho precepto legal es un cheque en blanco? ¿Que un evento haya sido declarado de interés colectivo o popular o de interés económico es determinante? ¿Es prioritario el derecho a la libertad de empresa en el marco de la economía de mercado o la tradición? ¿gozan de mayor protección los derechos fundamentales de los arts. 15 y 18 CE? Analizaremos la importancia de que concurran efectos aditivos e indirectos del evento, los niveles e intensidad de las inmisiones, la necesidad de adopción de medidas eficaces para evitar la lesión de los derechos de los vecinos, la relevancia o no del número de reclamantes, y si es viable una reclamación frente a un evento que transcurre durante una única jornada.

ABSTRACT

I will analyze the ruling of May 18, 2023, which ORDERS the City Council of Las Palmas de Gran Canaria that the celebration of the so-called Day Carnival that takes place in Vegueta, be moved to a place where the living conditions of the residents are not altered and the payment of compensation in the amount of €2,000 to each claimant for moral damages. The promoters of these parties and events invoke article 9 of Law 37/2003. We will break down different questions: Is this legal provision a blank check? Is the fact that an event has been declared of collective or popular interest or of economic interest decisive? Is the right to freedom of enterprise a priority within the framework of the market economy or is it tradition?; Do the fundamental rights, from Articles 15 and 18 of the Constitution, enjoy greater protection? We will analyze the importance of the event's cumulative and indirect effects, the levels and intensity of the immissions, the need to adopt effective measures to not infringe on citizens' Rights, the relevance or not of the number of claimants, and whether a claim is viable for an event that occurs during a single day.

Palabras Clave: Ruido, ocio, Derechos Fundamentales, tradición, suspensión, objetivos, Fiesta.

1. INTRODUCCIÓN

Pese a que en sus inicios el Carnaval de Día de Las Palmas de Gran Canaria nació con vocación de ser una fiesta familiar, tradicional, de día, y sin instalación de barras junto a los locales ubicados en las calles, sin embargo, en los últimos años ha venido transformándose en algo bien diferente, convirtiéndose en un macrobotellón que comienza durante el día y termina avanzada la madrugada.

Se viene celebrando durante 1 día (normalmente sábado) a la que le sigue su noche, con un aforo aproximado de 20.000 personas, en el que se suprime el mobiliario de las terrazas (mesas y sillas) en todas las calles y se sustituye por barras asignadas a determinados locales y se realizan conciertos. Dicho evento ocasiona indeseables efectos durante el día y la noche, como son los ruidos producidos por las pruebas de sonido, labores previas de instalación y las posteriores de recogida de las barras de los locales que están en dichas calles, ruido de la música de los conciertos, ruido por la afluencia de público y la aglomeración de personas bajo las viviendas de los reclamantes, ruido posterior de las labores de limpieza, y otros efectos aditivos como afección al medio urbano, suciedad, al dejar en el territorio numerosos residuos, basura y cristales, sin olvidar los olores de orines y vómitos en el entorno, etc.

El Ayuntamiento justifica dicha fiesta en que, al ser de día, no perturba el descanso de los residentes en la zona, que el Carnaval de Las Palmas de Gran Canaria ha sido declarada Fiesta de Interés Turístico de Canarias (2011) y de Interés Turístico Nacional (2017), pone de relieve la trascendencia nacional e internacional del evento y los beneficios que para el interés general tiene su celebración.

Reprocha la Corporación Municipal que los recurrentes pretendan convertir Vegueta en un barrio dormitorio cuando para evitar que solo unos ciudadanos pechen con todas las incomodidades de los actos que se celebran durante el Carnaval los mismos han sido distribuidos por diferentes Barrios de la Ciudad.

Los reclamantes presentaron año tras año ante el Ayuntamiento, desde el año 2015 hasta la fecha de la reclamación judicial, reclamaciones oponiéndose a la celebración de dicho evento, a fin de que no se celebre en el Barrio de Vegueta, solicitando se acuerde su reubicación a una zona adecuada para ello donde no se alteren las condiciones de vida de los vecinos, dada su incompatibilidad con los usos propios del carácter residencial del entorno. Dichas reclamaciones no fueron atendidas, por lo que los vecinos y vecinas acudieron al auxilio judicial.

2. ARGUMENTOS DE LA PARTE DEMANDANTE.

Los principales argumentos de la parte demandante son los siguientes:

1. Vulneración de derechos fundamentales. Se trata de un evento molesto que es perjudicial para la salud de las personas, y la contaminación acústica afecta al derecho a la integridad física y moral (Art. 15 CE), el derecho a la intimidad (Art. 18 CE) y el derecho a la inviolabilidad del domicilio (Art. 18.1 CE), así como otros derechos constitucionales como el derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado (Art. 45 CE) y el derecho de protección de la salud (artículo 46 CE)”.

Estamos en presencia de derechos fundamentales que prevalecen frente a los otros derechos como la libertad de empresa (artículo 38 CE) o el ocio (artículo 43.3 CE), que en modo alguno pueden tener un carácter absoluto, pudiendo verse limitados por aquellos que se consideran de rango superior, incluso en el caso de fiestas de interés turístico nacional, pues son derechos jerárquicamente superiores.

2. Infracción del artículo 9 de la Ley de Ruido 37/2003 de 17 de noviembre (Suspensión provisional de los objetivos de calidad acústica), y del artículo 50 de la Ley 7/2011, de 5 de abril, de actividades clasificadas y espectáculos públicos, que se desarrollen en las fiestas populares tradicionales y declaradas de interés turístico de Canarias, nacional o internacional.

Se censura que exista únicamente un estudio de afecciones de terceros, insuficiente por contemplar únicamente la instalación de un limitador acústico (sin contener mediciones certificativas de las previsiones que contempla) y no prever una fuente de ruido tan sustancial como la del propio público asistente, que el mismo no constituyera una medida correctora y que, además de todo lo anterior, contuviera graves errores. No se ha adoptado ninguna medida tendente a minorar la incidencia acústica, requisito que exige el citado precepto. La Administración no adoptó ninguna medida eficaz para evitar la lesión de los derechos de los recurrentes lo cuales se ven expuestos cada año a niveles de ruido intolerables durante horas, siendo tal situación claramente incompatible con su derecho a la salud, al descanso o a la inviolabilidad del domicilio.

En cualquier caso, la suspensión de objetivos de calidad acústica no implica la suspensión de los límites de recepción domiciliaria. Son conceptos diferentes. No cabe la suspensión de objetivos en el espacio interior (en viviendas). El domicilio es inviolable según la Constitución, por tanto, independientemente de que en un supuesto se fijaran o permitieran unos límites en fachadas o en el exterior del domicilio, lo que sin duda no pueden cambiar arbitrariamente

son los valores límite de recepción domiciliaria (30 dBA) ya fijados legalmente.

3. Ni se adoptaron por el Ayuntamiento medidas que justificaran la suspensión de los objetivos de calidad acústica permitidos en condiciones normales ni es posible adoptarlas por la propia morfología de las calles en que tiene lugar el evento.

4. Se ha producido Infracción de la normativa sobre ruido y sus límites acústicos, de la Ley de Ruido 37/2003 de 17 de noviembre, y del Real Decreto 1367/2007 que la desarrolla.

Instalar un limitador de sonido para la música, no soluciona en modo alguno los problemas de ruidos existentes, procedentes de fuentes de ruido NO CONTROLABLES por el limitador como es la que genera el público asistente, miles de personas bajo las viviendas.

Se realizó una campaña de mediciones a lo largo del día 23 de febrero hasta la madrugada del día 24 durante la celebración del evento Carnaval de Día, con el objeto de caracterizar las condiciones acústicas existentes.

Los niveles de ruidos evaluados superaron los niveles máximos permitidos de forma muy clara, debidos principalmente a todos los ruidos descritos por las diferentes fuentes de ruido identificadas:

- Ruidos provenientes del escenario situado en la carretera GC-110.

- Ruidos producidos por los altavoces distribuidos por la calle Pelota y Mendizábal.

- Ruidos producidos por la gran afluencia de público durante el evento, el desalojo y las labores de desmontaje de las barras.

- Ruidos producidos por las labores de limpieza tras el desalojo.

Los niveles se superaron tanto en horario diurno como nocturno. Los límites máximos permitidos fueron superados entre un 116% y un 600% en el caso del Real Decreto Estatal, y de un 270% y un 800% en el caso de la ordenanza. Cabe destacar que estos altos niveles que superan dichos niveles máximos permitidos no se producen de forma esporádica o aleatoria sino durante el 80% del tiempo de medida durante el evento y por encima del 60% del tiempo de medida durante las labores de limpieza.

Los niveles registrados son incompatibles con el descanso y el uso normal de una vivienda tanto de día como de noche.

3. ARGUMENTOS DEL AYUNTAMIENTO.

Los principales argumentos del Ayuntamiento son los siguientes:

1. Falta de legitimación activa de los recurrentes y ausencia de interés legítimo de los mismos.
2. Hay que tener en cuenta las particularidades de este evento y las circunstancias que lo rodean. Ha sido declarado “Fiesta de interés turístico de Canarias” así como “Fiesta de interés turístico nacional”.
3. El evento atrae a mucha gente (es popular) y tiene una repercusión económica favorable (es rentable).

“Aunque la sentencia pueda entenderlo como capricho político o que se está actuando en beneficio de la generalidad, la actividad que desarrolla este Ayuntamiento en el fomento de la Cultura y el Turismo es esencial para esta ciudad, siendo el Carnaval una de sus claves; debiendo los ciudadanos entender y participar en ese bien común”.

4. Se redactó un completo y detallado Plan de Seguridad y Autoprotección para el Carnaval de Día de Vegueta, dando lugar al dictado de la Resolución municipal donde se establecían las medidas correctoras a que debía sujetarse la celebración de las Fiestas de Carnaval de Día en Vegueta y la suspensión provisional de la normativa que regulaba los objetivos de calidad acústica.

5. Para el caso de estimar la demanda, se establecería una condena de futuro. La determinación del lugar en que deben ubicarse los eventos de Carnaval, es una cuestión que no es revisable por el juzgado sin que concurra arbitrariedad o infracción de norma.

Además, alega el Ayuntamiento que se interesa incongruentemente “reubicar” el evento, cuestión que no se podría reconocer sin realizar una propuesta de dónde ubicarlo.

6. Sería “injustificado que, un Barrio tan pintoresco y representativo como lo es Vegueta, donde se ubican las Casas Consistoriales, la Catedral y otros edificios que ayudan a exhibir la belleza de esta ciudad turística, se viera excluido porque a un grupo reducido de ciudadanos les incomode la presencia y deambulación de otros ciudadanos y foráneos celebrando las fiestas; de tal suerte que la propiedad privada tendría una preeminencia y unos derechos adquiridos sobre los bienes de dominio público y, por supuesto, del interés general y la seguridad ciudadana”

7. Subraya la Administración el enorme despliegue de unidades y entidades que se movilizaron en orden a autorizar la celebración del Carnaval de Día.

8. La indemnización de los daños y perjuicios no se acredita, ni consta que los demandantes estuvieran en sus domicilios, ni que les haya afectado la celebración. Y, además, no se reclamó previamente en vía administrativa la pretensión indemnizatoria, razón por la que la misma debiera inadmitirse de plano puesto que no hubo un expediente contradictorio de responsabilidad patrimonial.

9. Respecto al número de reclamantes, el Ayuntamiento manifestó que eran solo unos pocos.

4. FALLOS JUDICIALES.

El Juzgado de lo Contencioso-Administrativo nº 5 de Las Palmas de Gran Canaria, dictó Sentencia nº 170/2021 de fecha 5 de julio de 2021, que ESTIMÓ el recurso contencioso-administrativo presentado y en consecuencia anuló:

a) La Resolución de la Concejal de Gobierno del Área de Presidencia, Cultura, Educación y Seguridad Ciudadana, de fecha 15/2/19, por la que se acuerda establecer las medidas correctoras a que debe sujetarse la celebración de las fiestas del carnaval de Las Palmas de Gran Canaria 2019, y la suspensión provisional de la normativa que regula los objetos de calidad acústica durante la celebración de las mismas.

b) La Resolución de la Concejal de Gobierno del Área de Presidencia, Cultura, Educación y Seguridad Ciudadana de 22-2-19, que amplía la resolución con la aprobación de la medida correctora de estudio de afecciones de los actos de Carnaval de Día en Vegueta de 21-2-2019, que establece las medidas correctoras a que debe sujetarse la celebración de las fiestas de Carnaval de Las Palmas de Gran Canaria 2019, Carnaval de Día en Vegueta, y la suspensión provisional de la normativa de los objetivos de calidad acústica durante la celebración de las mismas.

c) La Resolución de la Concejal de Gobierno del Área de Presidencia, Cultura, Educación y Seguridad Ciudadana, por la que se acuerda aprobar la celebración del Carnaval de Día en Vegueta, en concreto en la GC 110 y las calles adyacentes como son Obispo Codina, Mesa de León, Calvo Sotelo, Armas, La Pelota y Mendizábal el día 23 de febrero entre las 12,00 horas y las 20,00 horas.

Y ORDENA al Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria que la celebración del denominado Carnaval de día que se desarrolla en Vegueta, y en las calles

adyacentes como son Obispo Codina, Mesa de León, Calvo Sotelo, Armas, La Pelota y Mendizábal y GC110, se traslade a un lugar donde no se alteren las condiciones de vida de los vecinos de dicho Barrio.

Asimismo, CONDENA al Ayuntamiento a satisfacer a los recurrentes y a cada uno de sus 4 hijos menores de edad la suma de 2.000 euros a cada uno de ellos en concepto de daño moral por el ejercicio 2.019 y otro tanto por el ejercicio 2.020.

Sin costas.

Dicha sentencia fue recurrida en apelación, habiendo recaído sentencia de la SECCIÓN SEGUNDA DEL TRIBUNAL SUPERIOR DE JUSTICIA DE CANARIAS, SALA DE LO CONTENCIOSO-ADMINISTRATIVO, de fecha 18 de mayo de 2023, confirmando el fallo de la instancia, salvo por lo que respecta a la indemnización del daño moral, limitándola a la anualidad del 2019, e incluyendo el incremento de los intereses legales de la misma hasta su completo pago. Sin costas. Aún no es firme.

Procede reseñar por su importancia algunos párrafos de las Sentencias referidas:

1. Sobre la legitimación activa:

«La legitimación activa con la que cuentan los recurrentes es clara por cuanto, como pone de manifiesto la Sra. Letrada de aquéllos en el trámite de conclusiones, lo que sustenta el litigio son los perjuicios que en la esfera personal y patrimonial de Doña ... produce la celebración del Carnaval de Día de Vegueta y si existe o no un deber jurídico por su parte de soportarlos. Luego un hipotético Fallo estimatorio repercutiría de manera inmediata en su esfera jurídica al verse liberados de las servidumbres propias de la celebración del Carnaval de Día en las calles en las que residen. No nos encontramos ante un asunto en el que se diluciden cuestiones que afecten únicamente a las Administraciones como se pretende sostener por el Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria, sino que inciden de manera inmediata en la vida de todos los ciudadanos, tanto de los que asisten al evento como de los que residen en las zonas donde aquél tiene lugar. Por tanto, Doña ... **tienen un evidente interés legítimo en la resolución del recurso administrativo porque las consecuencias de un eventual Fallo estimatorio determinarían que el Carnaval de Día de Vegueta dejara de celebrarse en las calles en que residen y, por tanto, dejarían [de] verse expuestos de inmediato y pro futuro a las inmisiones que afirman padecer (...)**»

2. Sobre la invasión competencial y condena de futuro:

«La circunstancia que se ordene al Ayuntamiento la búsqueda de un nuevo emplazamiento no supone invasión competencial alguna por parte del Juzgado como indican las Resoluciones antes reproducidas y **tampoco nos encontramos ante una condena de futuro** pues constatada una realidad física e inamovible (la propia configuración de las calles en las que se celebra el Carnaval de Día) y la imposibilidad de adoptar medidas correctoras del ruido generado por la celebración del Carnaval de Día, otro pronunciamiento en sentido distinto condenaría a los recurrentes a peregrinar anualmente ante el Juzgado para explicar circunstancias que ya han sido plenamente probadas, que no es necesario reiterar y sobre las que basta un único pronunciamiento judicial».

Compartimos la fundamentación del Tribunal cuando indica que “ni se adoptaron por el Ayuntamiento medidas que justificaran la suspensión de los niveles de ruido permitidos en condiciones normales ni es posible adoptarlas por la propia morfología de las calles en que tiene lugar el evento. Ello condena a los recurrentes a ver lesionados sus derechos año tras año sin que jurídicamente ello sea amparable por muchos títulos que reciba el evento.

3. Sobre el interés del evento y la protección preferente de los derechos fundamentales:

“Pero es que, además, tiene razón la representación procesal de Doña. ... cuando afirma:

“Que un evento haya sido declarado de interés colectivo no es determinante. Ese interés general se reduce al aspecto económico, que no es suficiente para justificar la violación de un derecho fundamental (...)”.

Con independencia de remitirnos a la jurisprudencia que cita esta parte, también resulta ilustrativo traer a colación lo que la Sala tuvo ocasión de decir en otro asunto de indudable similitud con el que ahora nos ocupa (ruidos en el entorno de las calles Isla de Cuba, Joaquín Costa y Fernando Guanarteme de esta capital). En nuestra Sentencia 229/2022, de 6 de julio (rec. 55/2022 DF, pendiente del recurso de casación interpuesto por la Corporación local recurrente) señalamos lo que sigue:

«Por ello, resulta inaceptable que el Ayuntamiento invoque, en su crítica a la sentencia combatida, la hipotética vulneración de la libertad de empresa en el marco de la economía de mercado; no sólo porque, cuenta habida de su sistemática constitucional, el derecho del art. 38 de la Constitución Española (CE) es un derecho constitucional, stricto sensu, que goza de menor protección que la que se otorga a los derechos vulnerados, **auténticos derechos fundamentales ubicados en el Capítulo II, Sección Primera, del Título I (reconocidos y garantizados en los arts. 15 y 18 CE) (...)**» (FJ 3).”

Que el Carnaval de Día haya sido declarado “Fiesta de interés turístico de Canarias” así como “Fiesta de interés turístico nacional” no es incompatible con que se celebre en un lugar en el que se puedan adoptar las medidas correctoras oportunas para que no se vulneren los derechos de ningún vecino.

Como indica el Tribunal “No se ha demostrado por el Ayuntamiento que tales menciones estén relacionadas directamente con el lugar en que se celebra el Carnaval de Día, por lo que cabe presumir que tales honores obedecen a la fiesta en si misma considerada.”

4. Sobre la innecesaridad de que haya un número mínimo de reclamantes:

“Se comparte, pues, la crítica que se hace a la parcialidad, la falta de rigor y la contradicción en que ha incurrido el testigo-perito, que se extraen de su intervención en la vista celebrada. Destacamos las siguientes objeciones:

- Al reaccionar con la siguiente frase (en consonancia, sintomáticamente, con la postura del Ayuntamiento en este pleito): “Son sólo 3 vecinos los que reclaman” (enfaticando el número con tres dedos de su mano izquierda; minuto 10:45:10.733 de la grabación). A lo que la Magistrada respondió: “eso es irrelevante, con que haya uno tenemos el asunto”.

5. Sobre el artículo 9 de la Ley 37/2003 del Ruido.

“Tiene razón la parte apelada cuando sostiene categóricamente:

“Por tanto, el artículo 9 [de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido] y 50 **no son un cheque en blanco** para la Administración” (p. 32 del escrito de oposición, con reenvío a las acertadas consideraciones que se recogen en la Alegación Decimotercera, pp. 26 y ss.)

“En conclusión, ni se adoptaron por el Ayuntamiento medidas que justificaran la suspensión de los niveles de ruido permitidos en condiciones normales ni es posible adoptarlas por la propia morfología de las calles en que tiene lugar el evento.”

6. Sobre la seguridad del evento.

“Ahora bien, la Sala no puede dejar de manifestar su extrañeza por la constatación de determinados datos que, en relación con la seguridad del evento (asunto no menor, desde luego), quedaron una vez más al descubierto con motivo de la prueba pericial practicada en esta segunda instancia (ratificación judicial del Plan de Seguridad y Autoprotección

Carnaval Día de Vegueta, elaborado por el técnico ...) Esta información se expone con claridad en las conclusiones de los apelantes/apelados:

“Además, el 19-2-19 se presenta el Plan de Seguridad de Autoprotección del Carnaval de Día Vegueta, del que es autor D. ... habiéndose dictado con anterioridad a su presentación la Resolución 5829/2019, de 15/2/19 que establece las medidas correctoras que exige el artículo 50 de la Ley 7/2011, de actividades clasificadas canaria, entre ellas las de seguridad. Es decir, se aprueba una resolución que adopta medidas correctoras en virtud del artículo 50, sin haberse presentado el plan y habiendo comenzado los actos el día 9 de febrero.

Se dicta la resolución del Carnaval de día de Vegueta el mismo día que se celebra, el día 23 de febrero, habiendo tenido a disposición el ayuntamiento el plan de autoprotección dos días y medio antes para informarlo y verificar si es conforme a derecho. Y esta cuestión y premura también fue observada e invocada por la Policía Local cuando se le remitió el plan para su examen estudio e informe”.

Estos datos demuestran, cuando menos, que las cosas no se estaban haciendo del todo bien por la Administración apelante (por muy “vivo” que pudiese haber estado el procedimiento en curso, como trató de justificar el Sr. ... en el acto de la vista).

5. CONCLUSIÓN.

La actividad de la Administración ha sido insuficiente e ineficaz. El tribunal considera que debe entenderse inaplicable el artículo 9 de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, conforme al cual “las Administraciones públicas competentes podrán adoptar, en determinadas áreas acústicas, previa valoración de la incidencia acústica, las medidas que dejen en suspenso temporalmente el cumplimiento de los objetivos de calidad acústica con motivo de actos de especial proyección oficial, cultural, religiosa o de naturaleza análoga...” porque es preciso la adopción de medidas efectivas, materiales y reales para ello.

En todo caso, lo que, conforme a la normativa del ruido se podría suspender si concurrieran los requisitos exigidos por la norma, son los objetivos de calidad acústica (art. 9 Ley 37/2003), pero en ningún caso cabe la suspensión de los derechos fundamentales a mantener un espacio habitable durante el conjunto de los días del año, más aún cuando no se está en un entorno sometido a una servidumbre acústica (art. 7 RD 1367/2007). Los derechos constitucionales no se pueden suspender.

El artículo 7.2 del Código Civil indica que los derechos habrán de ejercitarse conforme a los principios de la buena fe

y que la ley no puede amparar el abuso del derecho o el ejercicio antisocial del mismo. Un ayuntamiento no puede aprobar un evento que conlleve abusos y ejercicios antisociales, teniendo como consecuencia la suspensión de los derechos constitucionales de los vecinos afectados. Comparto la idea de que, en un lugar con un uso residencial, como Vegueta, es un imposible.

Como se indica en la sentencia, el interés particular no debe ceder ante el general ni se puede justificar al margen de la legalidad porque se trate de una actuación temporal, con una duración limitada, ni porque se incardine dentro de los múltiples festejos populares que se celebran. Si no es posible el cumplimiento de los límites sonoros es preciso buscar un nuevo emplazamiento. Por tanto, es irrelevante que el evento transcurra durante una única jornada a la vista de la intensidad de las inmisiones y del número de horas en que las mismas se mantienen en niveles máximos.

En virtud del principio de jerarquía normativa, los derechos fundamentales a la intimidad e inviolabilidad domiciliaria y a su integridad física y moral, previstos en los artículos 18.1, 18.2 y 15 de la CE, son de protección preferente y no pueden ser vulnerados con el argumento de que la fiesta “es un revulsivo para poder tener caja ese día” potenciando el ánimo de lucro preferentemente en perjuicio de la protección de los derechos fundamentales de los vecinos. No cabe priorizar los réditos económicos y sociales derivados de la explotación lúdica de Barrios frente a los derechos fundamentales.

Como venimos defendiendo, hay actividades contaminantes incompatibles con el uso residencial, es decir, la distancia del foco ruidoso de las viviendas es la única solución real. A ello hay que añadir, los efectos aditivos y acumulativos de las actividades: botellones, acumulación de basuras, orines, vomitonas, borracheras, malos olores, ruidos de recogida y limpieza.

En el procedimiento judicial estudiado, se identifica la aglomeración de personas (que se calculan nada menos que en una cifra de 20.000) como una de las fuentes de ruido de mayor incidencia, resultando técnicamente imposible apantallar las calles afectadas ni la adopción de medidas correctoras para evitar el ruido proveniente de las mismas.

Compartimos, como S.S. indica, que “El Gobierno Municipal debe atender a todos, no sólo a una mayoría deseosa de tener ocio y esparcimiento, demonizando a ciudadanos, tachándoles de egoístas e insolidarios,” cuando son los auténticos perjudicados, a los que la Corporación Municipal, desoye “priorizando los réditos económicos y sociales derivados de la explotación lúdica del Barrio.” El título de la Fiesta no legitima la vulneración de derechos fundamentales. En el año 2023, el Carnaval de Las Palmas de Gran Canaria ha sido declarado “Fiesta de interés turístico internacional”,

lo cual no altera en modo alguno la situación jurídica relatada ni el debido cumplimiento de las resoluciones judiciales.

Las indemnizaciones concedidas son precisamente el resultado de ese abuso de derecho y de los daños morales que se han causado. Pero la consecuencia inmediata de la sentencia es la recuperación de la calidad de vida, de la salud, y de los derechos fundamentales, el derecho de las personas a poder estar tranquilas en sus domicilios tras las inmisiones sistemáticas y demás efectos padecidos por durante años.

Se trata del “derecho a ser dejado en paz”.



EL RUIDO Y LA JURISDICCION PENAL

Ricardo Ayala Martinez

Abogado. Colegio de Abogados de Madrid

RESUMEN

En la ponencia comentaremos las últimas sentencias en las que se han establecido condenas en el ámbito penal por delito contra el medio ambiente que han afectado gravemente la calidad de vida y la salud de las personas en la ciudad por actividades de ocio, inicialmente amparadas por licencia administrativa pero que han hecho fraude o abuso de la misma infringiéndola de forma consciente, grave y reiterada

ABSTRACT

In the presentation we will comment on the latest sentences in which criminal convictions have been established for crimes against the environment that have seriously affected the quality of life and health of people in the city for leisure activities, initially covered by administrative leave but who have made fraud or abuse of it by infringing it consciously, serious and repeated.

INTRODUCCION

El derecho penal es un derecho reservado solo para los casos más graves. es un derecho de mínimos.

Siempre los ruidos han estado acotados por el derecho administrativo y luego, y no hace mucho, y con arduo esfuerzo, al derecho civil dentro de la esfera de los derechos fundamentales de la persona.

Estos esfuerzos han ido llevando paulatinamente la defensa de estos derechos al ámbito penal asumiendo la importancia que tiene preservar el medioambiente en nuestras mega ciudades y sociedades industriales y tecnológicas. este medioambiente es también el medioambiente urbano. donde vive la mayoría de las personas.

Siempre se ha dado, y se da, un conflicto de jurisdicciones tratando que las administraciones y luego los tribunales contencioso administrativos se ocupen de ello, y también enviando su resolución a los tribunales civiles.

En realidad son los Ayuntamientos los que deberían acudir a la vía penal en el caso de que la contaminación sea grave y sean desobedecidas sus resoluciones. y también al constatar las falsedades que contienen las declaraciones responsables, sin que ningún funcionario de cuenta a la Fiscalía.

Al no ser así, el ciudadano, desamparado de su Administración, entra en un bucle de denuncias estériles y la penitencia de pelear para convencer a los tribunales de la gravedad de su problema, implorando una solución que se demora infinitamente.

BASE JURISPRUDENCIAL DEL DELITO

Por fortuna, lentamente, la jurisdicción penal va haciendo eco de la gravedad de la contaminación acústica causada por las actividades urbanas (amparadas por licencia) a los vecinos que las sufren en fraude o abuso de las mismas.

En esta línea venimos a comentar la última sentencia que hemos conocido en el denominado Caso del Bar Especial Royal dictada por Tribunal Supremo de 16 febrero 2022 que viene a ratificar la dictada por la Audiencia Provincial de Madrid.

La propia sentencia ya cita la jurisprudencia que ha ido labrando el Tribunal Supremo al respecto.

Lo más destacable, a efectos de determinar los elementos diferenciadores del delito frente al ilícito civil o meramente administrativo, es:

Ha de haber actuaciones administrativas sancionadoras de la infracción y que haya sido desobedecida por el agente contaminante.

Debe tener conocimiento de su conducta de alguna manera: no tiene que saberlo directamente por el perjudicado. Basta haber sido informado por la policía o ayuntamiento, y no tiene que conocer los daños exactos que ocasiona.

Estas infracciones deben afectar de forma suficientemente importante al ciudadano para alterar su forma de vida en su domicilio, tanto por su intensidad como por su prolongación en el tiempo.

Sin embargo, y esto es más destacable de la sentencia: la repercusión del ruido no tiene porqué causar daños físicos o psíquicos a los denunciantes ya que el denunciado conoce el riesgo potencial que conlleva su acción, y no lo evita. Esto es, un dolo eventual o acción más allá de la falta de cuidado (negligencia) susceptible de producir un daño previsible.

En otras palabras, es tan evidente sus consecuencias que no puede ignorar el daño grave, el sufrimiento, que está causando y aun así continúa haciéndolo con manifiesto desprecio a sus víctimas y en flagrante y consciente incumplimiento de la normativa administrativa, y desobediencia a la autoridad.

El bien jurídico lo constituye la posibilidad del riesgo o de un perjuicio grave para la salud de las personas en relación a la normativa administrativa infringida. Por lo que no es un delito que exija un resultado de lesión física de la víctima

Es un delito de peligro hipotético, de peligro potencial, o de propia aptitud del agresor. En consecuencia no se tipifica un resultado concreto sino un comportamiento idóneo o suficiente como para poner el bien jurídico protegido, la salud, en riesgo objetivo. Así pues, no se castiga la situación de peligro en sí mismo, sino el comportamiento concreto que se realiza poniendo en riesgo efectivo a las personas y comprometiendo sus derechos fundamentales.

En cuanto a la prueba del daño no se precisa que sea físico, que cause lesiones; basta con que sea daño moral, es decir, que genere sufrimiento. Y para ello se considera suficiente la declaración de las víctimas, sus actos durante el perjuicio, y las demás pruebas concurrentes: declaraciones de testigos, policías y informes técnicos.

Ello conlleva aparejada una responsabilidad civil indemnizatoria para resarcir el daño moral de forma pecuniaria, que desde luego siempre viene siendo escasa para la víctima que ha sido expuesta al ruido durante mucho tiempo y ha visto alterada su vida normal.

No es causa eximente que las actas no hubieran sido notificadas o cuando se haya producido el delito aun no hayan sido firmes. Lo importante es tener conocimiento de que está infringiendo la normativa y que está produciendo daños a personas.

No es causa eximente que después de un tiempo haya dejado de ejercer la actividad.

CONCLUSION

La protección del silencio, entendido como un derecho de la persona a ser respetado en el ámbito del hogar, de su privacidad personal y familiar, ha alcanzado por fin la protección punitiva del Estado a través del derecho penal



cuando los daños que ocasiona el agente emisor con su actividad son graves y deliberados, otorgándole así al ciudadano instrumentos para ser reconocido como víctima digna de protección y reparación frente estas agresiones, mas allá del ámbito de las normas administrativas que hayan sido vulneradas.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

PSA-0 Procesamiento de señales acústicas.

COMPORTAMIENTO DE LOS AMPLIFICADORES BAJO DIFERENTES SEÑALES DE ENTRADA.

Alberto Fueyo Gallego^{1*}

¹Acoustics Team Leader – WSP Spain

RESUMEN

Los sistemas de amplificación que forman parte de un sistema de evacuación por voz tienen unas características específicas, no solo por la normativa que tiene que cumplir sino también por las señales que suelen reproducirse en ellos. Estas señales varían dependiendo de si se trata de la fase de testeo, comisión del sistema o uso en una situación de evacuación real. Por tanto, es fundamental entender las limitaciones que tiene cada sistema para así poder replicar ese comportamiento en los softwares de simulación acústica.

De este modo, no solo podemos ajustar los valores de potencia sonora requerido por los sistemas si no que podemos predecir el nivel de presión sonora del sistema y por tanto la inteligibilidad.

Se han realizado mediciones en 10 sistemas diferentes y se han medido y evaluado las señales de salida, permitiendo definir las consideraciones que se deben tener en cuenta cuando se diseña, comisiona y usa un sistema con estas características.

ABSTRACT

Sound Systems for Emergency Purposes (SSEP), whether connected to a fire detection system or not, are part of the life safety system of a building and hence it is crucial that for the safety of the occupants the systems are compliant. The amplification system is an important component of the SSEP and so understanding its behavior is important when predicting whether the required performance will be achieved.

Historically SSEP amplifiers were a box where analogue signals were amplified but without other signal processing. The published power rating of those “old style” amplifiers were often pessimistic achieving more than the rating suggested. Due to these “overdesigned” amplifiers, the predicted SPL was not critically affected by the headroom allowed during the modelling process. The SPL could often be achieved even when the signal did not fit within the supply

rails of the amplifier, i.e. the designs of these amplifiers were forgiving.

In this investigation, the behaviour of amplification systems is assessed with not only sine waves and the well-known and widely used STI-PA signal, but also real speech. The important difference between these signals as far as this investigation is concerned, is the amplitude in the time domain. The hypothesis of this investigation is that the behaviour of amplification systems depends on the crest factor of the input signal. In other words, the on-time voltage applied to the amplification systems.

Palabras Clave— Megafonía, amplificación, evacuación por voz.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña un sistema de evacuación por voz es fundamental establecer un valor objetivo de nivel de presión sonora. Este valor viene limitado por varios factores y componentes, siendo el más relevante los amplificadores o sistemas de amplificación que forman parte del sistema.

Históricamente los sistemas de amplificación eran grandes cajas con componentes sobredimensionados de tal forma que podían alcanzar voltajes de salida mayores a los establecidos por el fabricante, pero en los últimos años se han empezado a diseñar sistemas más eficientes con un diseño más refinado minimizando ese “sobredimensionamiento”

Durante más de 10 años se han medido diferentes sistemas de amplificación que no podían alcanzar el objetivo de voltaje de salida esperado por el consultor. Lo que afectaba de forma directa al valor final de nivel de presión sonora del sistema (SPL).

El factor de voltaje presente por los fabricantes en los datasheets son medidos con una configuración específica, conectados a un número de resistencias específicas que pueden o no representar a la situación de los equipos una vez instalados.

Hay que recordar que los sistemas de evacuación por voz suelen tener las siguientes características:

* **Autor de contacto:** Alberto.fueyo@wsp.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

- Todos los canales de salida están activos a la vez.
- Requieren altos niveles de SPL.
- La calidad del audio es secundaria.
- Las señales que reproducen son señales habladas.

El estándar de verificación de los sistemas de amplificación que forman parte de un sistema de evacuación por voz es el EN54-16 el cual establece en la cláusula 16.1.5 lo siguiente:

“All voice alarm output circuits and transmission paths shall be connected to cables and equipment or to dummy loads. At least one of each type of voice alarm output circuit shall be loaded to its maximum capacity within the manufacturer’s specification.”

Esto implica que la medición de la potencia eléctrica del amplificador se puede hacer con solo un canal lo cual es muy posible que no represente el uso real del amplificador, llegando el caso en el cual el power supply unit (PSU) del sistema no sea suficientemente grande como para mantener esa potencia en todos los canales del amplificador una vez que todos los canales son utilizados simultáneamente.

Además, como se ha mencionado previamente en los amplificadores se mide su potencia eléctrica con una señal de seno de 1kHz, la verificación de inteligibilidad del sistema se mide con una señal pseudorandom como puede ser STI-PA y el sistema luego se utiliza con señales habladas. Dichas señales son muy diferentes y su comportamiento es totalmente diferente cuando los sistemas de amplificación las procesa.

Durante esta investigación con concepto “burst mode” se introdujo por un fabricante de sistemas de amplificación. El concepto es que el sistema puede alcanzar alto niveles de potencia sonora pero solo durante un periodo de tiempo limitado (<1 segundo). Después de ese periodo de tiempo la potencia del amplificador se reduce.

2. MEDICIÓN DE VOLTAJE

Debido a lo rápido que cambian los voltajes en algunas señales como las del habla, se ha decidido utilizar un sonómetro Clase 1 configurado en modo rápido y decibelios ponderados Z, Utilizando una señal estable de 1kHz se ha calibrado el sonómetro de tal forma que se pueda identificar el valor de voltaje de salida en referencia a una escala de 0.1dB.

Esta calibración se ha realizado con un amplificador tipo mientras el sistema opera en la región lineal del sistema.

$$dBu = 20 \log_{10} \frac{V}{0.775} \quad (1)$$

Al representar la regresión lineal del voltaje de salida en dBu vs L_{zeq} y utilizando la ecuación 2 se ajusta la constante C para correlacionar los dBs del sonómetro con los valores reales de V_{RMS} .

$$dBu_{SLM} = L_{zeq} + C \quad (2)$$

3. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

El equipamiento utilizado durante las mediciones es el siguiente:

- NTI MR-PRO generador de señales.
- WinMLS measurement system v2004,1.07e.
- Rion sonómetro grabador tipo NL-52 con 2 x 20dB atenuadores.
- Fluke RMS medidor digital.
- NTI XL2 STI-PA medidor.
- AXYS D-Audio tarjeta de audio.
- Resistencias.

Las señales utilizadas durante los tests y almacenadas en el NTI MR-PRO son las siguientes:

- 1kHz seno, 3dB factor de pico.
- STI-PA, 14dB factor de pico.
- Mensaje de emergencia del metro de Londres, en loop sin silencios entre mensajes, palabras por minuto: 139 (normal) and 200 (rápido), 15dB factor de pico

Previamente a almacenar las señales en el NTI MR-PRO todas las señales fueron ajustadas al mismo valor de voltaje RMS a excepción del mensaje de emergencia que fue ajustado 3dB menos.

El factor de pico del mensaje de emergencia fue ajustado a 15dB utilizando un limitador. El mensaje se ha ajustado a 15dB para correlacionarlo con el valor VRMS con la señal psdo-random de ruido rosa. El ajuste de +3dB corresponde con lo descrito en el estándar EN 60268-16:2020.

La siguiente figura representa la configuración entre el sistema de amplificación, sonómetro, resistencias y generador de señales.

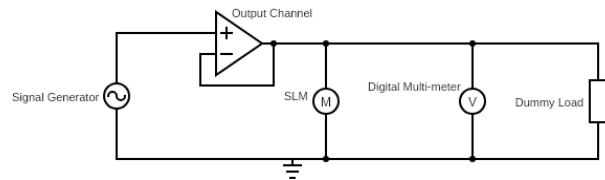


Figura 1. Esquema del circuito de medición.

Para determinar la resistencia requerida para cada canal, se ha utilizado el valor entregado por los fabricantes. Todas las mediciones se realizaron en Europa y por tanto los sistemas estaban configurados en 100V.

Utilizando la siguiente ecuación se relaciona la impedancia (Z), voltaje (V) y potencia(W) se ha calcula la resistencia máxima para cada canal de cada amplificador:

$$Z = \frac{V^2}{P} \quad (3)$$

Cuando ha sido posible se ha cargado al máximo los sistemas de amplificación. Debido a las resistencias

disponibles, hay dos sistemas que no se han podido medir con la “carga máxima”.

Para cada señal se ha empezado con un nivel de voltaje de entrada suficientemente bajo asegurando que los sistemas estaban operando en la zona lineal. El voltaje de la señal de entrada se ha ido aumentando en rangos de 1dB hasta que se ha detectado que el sistema de amplificación no estaba siendo operado en la zona lineal, en ese punto el rango de aumento se reduce a 0.2dB para mejorar la resolución. Cuando los niveles de voltaje de salida no cambiaban y se mantenían constantes se entendía que ese era el valor máximo de voltaje de ese sistema con esa señal.

Todas las señales de salida de los sistemas de amplificación han sido grabadas por el sonómetro en una tarjeta SD.

Si el sistema de amplificación alcanzaba el voltaje esperado, se considera que el sistema cumple con las especificaciones, si el sistema alcanza un voltaje de salida mayor se entiende que el sistema esta sobredimensionado.

Se ha detectado que los sistemas de amplificación pueden variar su funcionamiento debido a la saturación de los componentes, por tanto, se considera válida la medición si se mantiene el voltaje de salida durante 30 segundos con las señales de STI-PA y el mensaje de evacuación y 5 segundos con la señal de seno.

4. RESULTADOS: 1KHZ

El primer test de linealidad de los sistemas de amplificación se ha realizado con la señal de 1kHz.

El voltaje de salida esperado es 100V (42.2dBu), por tanto, se espera que los sistemas sean lineales hasta ese voltaje de salida.

A partir de ese punto si el sistema sigue comportándose de forma lineal se entiende que el sistema está sobredimensionado y da mas potencia de salida que la especificada por el fabricante. En caso de no alcanzar ese nivel de voltaje de salida, se entiende que el sistema no entrega la potencia que especifica el fabricante.

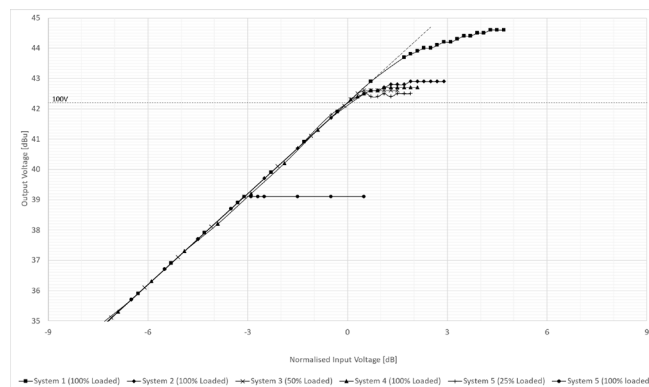


Figura 2. Test lineal 1kHz (sistemas 1-5).

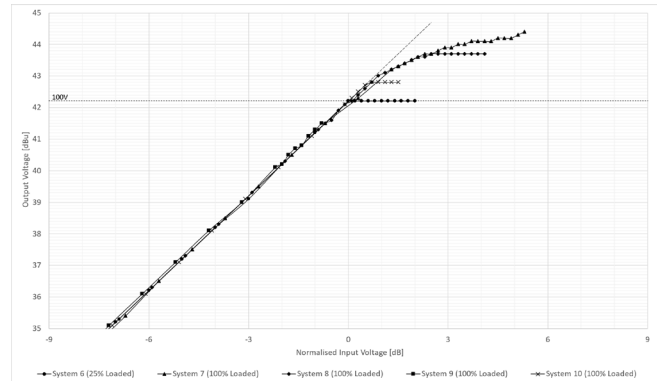


Figura 3. Test lineal 1kHz (sistemas 6-10).

Como se puede ver de las figuras 2 y 3, todos los sistemas pueden alcanzar los 100V de salida a excepción del sistema 5 cuando tiene todos los canales de salida activos y el sistema 9. El resto alcanzan o superan en la región lineal los 100V. El sistema 5 cuando solo tiene un canal de salida activo si alcanza los 100V de salida. Esto no pasa cuando todos los canales están activos como es normal en los sistemas de evacuación por voz.

El sistema 9 no puede mantener el voltaje de salida durante mas de 1 segundo y por tanto se considera que no alcanza 100V. Este sistema esta definido por el fabricante como un sistema de “burst mode” y no está certificado con el standard EN54-16.

Respecto a la transición de los sistemas de la zona lineal a la no lineal. Se distinguen dos comportamientos: Uno en el cual el sistema pasa de lineal a no lineal sin ningún tipo de transición y otro el cual se pasa a la región no lineal de forma gradual.

RESULTADOS: STI-PA

La señal de STI-PA tiene un factor de pico de 14dB mientras que el mensaje hablado tiene un factor de pico de 15dB por tanto es de esperar que el voltaje de salida corresponda con una señal de factor de pico de 12 dB.

El voltaje de salida esperado es 35,6V (1/8W). Idealmente el sistema debería de ser capaz de reproducir la señal de STI-PA a 1/3 de la potencia total del amplificador, lo cual

representaría una señal hablada de 11dB de factor de pico (señal del habla a partir del cual se nota la distorsión).

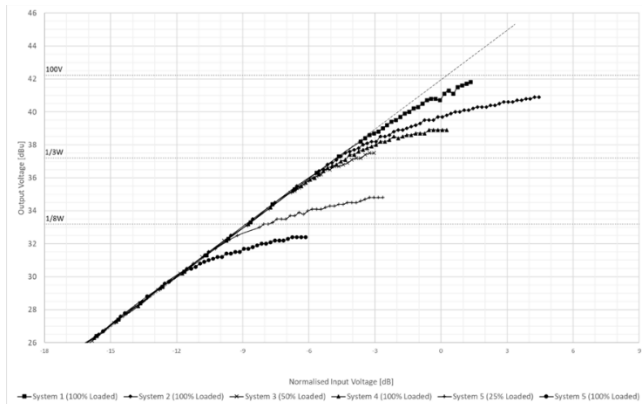


Figura 4. Test lineal STI-PA (sistemas 1-5).

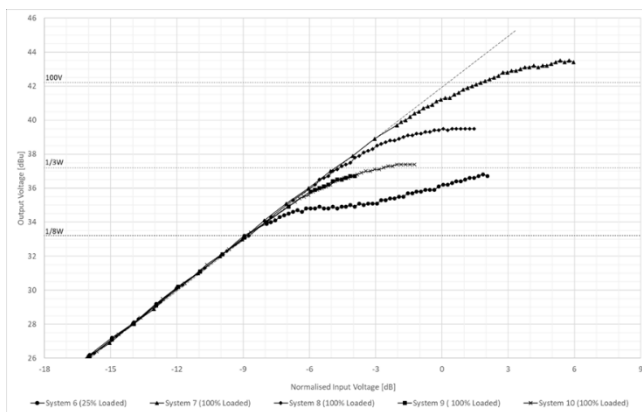


Figura 5. Test lineal STI-PA (sistemas 6-10).

Los sistemas que no conseguían alcanzar 100V de salida con 1kHz siguen sin alcanzar el valor requerido de 1/8W con la señal de STI-PA.

Como se ha demostrado en el test con la señal de 1kHz, los sistemas 1 y 7 entregan mayor potencia que la especificada por el fabricante y por tanto pueden operar en la región lineal alcanzado 1/3W.

Los sistemas 2, 3, 4, 8 y 10 pueden alcanzar 1/8W en la región lineal y alcanzan el 1/3W en la región no lineal.

A pesar de que el sistema 9 no ha podido alcanzar los 100V de salida con la señal de 1kHz pero si ha podido alcanzar 1/8W en la región lineal.

RESULTADOS: MENSAJE DE EMERGENCIA

Para determinar si los sistemas pueden reproducir el mensaje de evacuación al mismo nivel que la señal de STI-PA se ha utilizado el mismo método de medición.

Basándose en el ajuste de +3dB recomendado por el estándar EN 60268-16:2020 el mensaje de emergencia debería de alcanzar 1/16W (25.1V) para poderse correlacionar con la

señal de STI-PA. Idealmente el mensaje debería de poder alcanzar 1/7W (39.8V) que corresponderían con 1/3W con la señal de STI-PA.

Los dos primeros tests y señales, no son señales que los sistemas vayan a reproducir en una situación real de emergencia. La señal que van a reproducir tendrá características semejantes a la señal ejemplo de mensaje de emergencia y por tanto estos valores medidos de voltaje de salida son los que deben considerarse cuando se diseña un sistema de evacuación por voz.

La comparación entre el mensaje de evacuación normal (139 palabras por minuto) o el rápido (200 palabras por minuto) no ha arrojado ninguna diferencia y por tanto se exponen los resultados del mensaje normal.

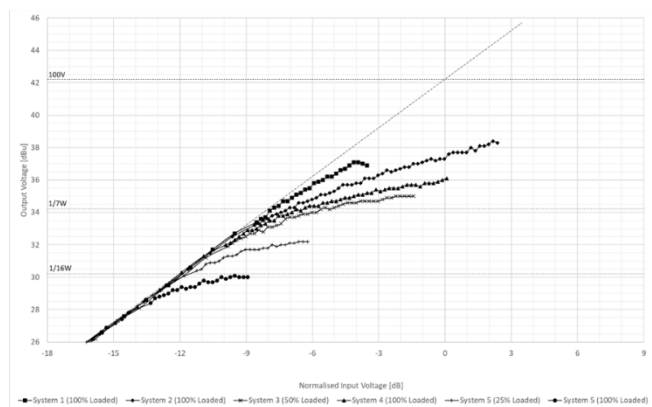


Figura 6. Test lineal mensaje (sistemas 1-5).

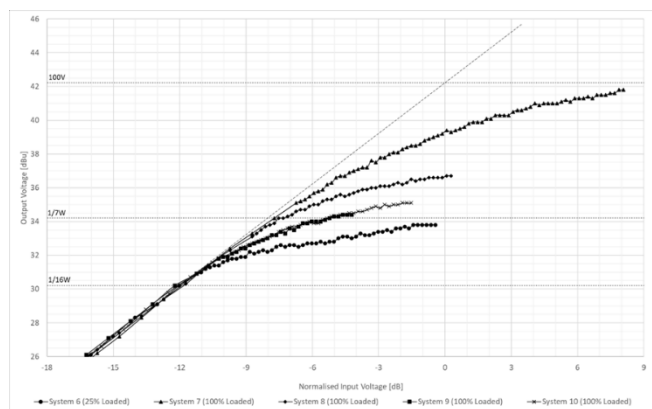


Figura 7. Test lineal mensaje (sistemas 6-10).

Como el factor de pico a de una señal comprimida, como es el mensaje de emergencia utilizado, no puede ser controlado, se deben utilizar los railes del sistema de amplificación para comprimir la señal de salida utilizando la saturación del sistema.

Como muestran las figuras de arriba, el sistema 5 cuando esta cargado al 100% no puede alcanzar el nivel de potencia deseado. Tampoco lo alcanza cuando el sistema esta cargado

al 25%, el cual, si alcanzaba los 100V, esto es debido a que el factor de pico de la señal a aumentado al pasar por el sistema de amplificación y este limita la señal de salida cuando se satura.

El sistema 6 es capaz de alcanzar el $1/16W$ en la región lineal pero no es capaz de comprimir la señal hasta el $1/7W$.

El resto de los sistemas alcanza el nivel de potencia $1/16W$ requerido y consigue comprimir la señal hasta alcanzar el $1/7W$.

Para visualizar el efecto de compresión de los amplificadores en la señal de voz, la siguiente figura representa el análisis en el tiempo de la palabra “Immediately”. La primera figura (a) es el original y las siguientes son la señal de salida a $1/7W$ de los sistemas 1 (b), 2(c) ,3(d) y 4 (e)

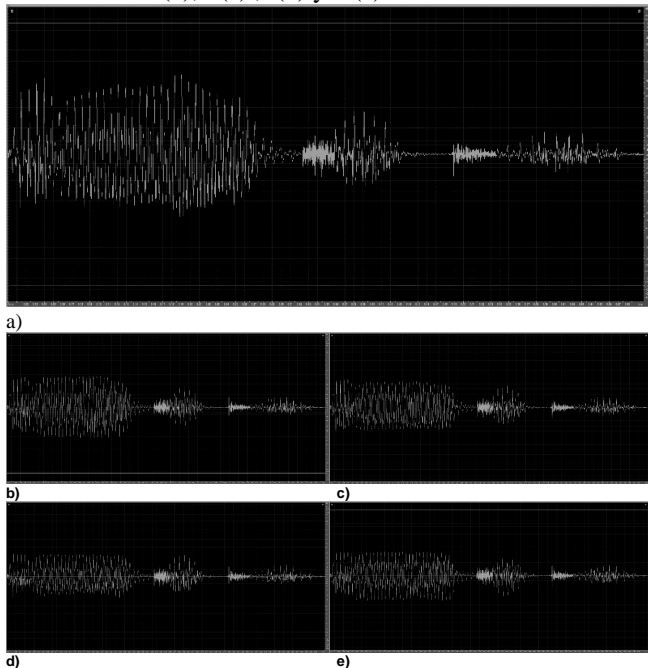


Figura 8. Representación en el tiempo de la palabra “Immediately”.

CONCLUSIONES

La elección del sistema de amplificación que forma parte del sistema de evacuación por voz suele ser posterior a el proceso de modelado acústico.

Como se ha demostrado en este artículo, la variación entre 10 sistemas es tal que puede haber diferencias de hasta 5 decibeles de nivel de presión sonora.

La persona encargada de diseñar, verificar y poner en marcha el sistema deberá de tener en cuenta todos estos factores para lograr la mejor solución.

SISTEMAS DE MEGAFONÍA, INTELIGIBILIDAD, STI Y SEÑALES DE VERIFICACIÓN

Alberto Fueyo Gallego^{1*}

¹Acoustics Team Leader – WSP Spain

RESUMEN

El objetivo final de todo sistema de megafonía, que es utilizado en caso de emergencia, debe de ser el cumplimiento de la inteligibilidad exigida por la normativa. Dicha inteligibilidad normalmente se evalúa con el STI o Speech Transmission Index recogido en el UNE-EN 60268-16. Dicho estándar establece una señal similar al ruido rosa para la comisión de estos sistemas.

Por otra parte, la norma EN-54 establece otro tipo de señales para establecer el nivel de potencia de los sistemas de amplificación, por tanto, tenemos al menos 3 tipos de señales que son utilizadas en 3 momentos diferentes durante el diseño, instalación, verificación y utilización de un sistema de megafonía.

Como interactúan estas señales, sus características y como afectan a la inteligibilidad es necesario para el correcto diseño de un sistema de evacuación por voz. Durante esta investigación se ha evaluado los niveles de compresión a los que pueden ser sometidos cada señal sin que se vea afectado el resultado final.

ABSTRACT

The communication has to include also the abstract in English Language. You do not need to literally translate the Spanish version, but it has to contain the same ideas and concepts. In case you write your communication directly in English, you only have to write the abstract in this language.

Palabras Clave— Inteligibilidad, STI, Evacuación por voz.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que los sistemas de megafonía suelen tener un uso mixto de mensajes de información general y de evacuación en caso de emergencia, el escenario más demandante de potencia sonora y exigencia de inteligibilidad se considera en el que el sistema se usa como un sistema de emergencia.

Un escenario en el que un sistema de megafonía se utiliza para evacuación tiene las siguientes características:

- Altos niveles de potencia sonora (87dBA)
- Todas las zonas de altavoces están activas (All Call)
- Reproducen señales de voz.
- Lo importantes es la inteligibilidad no la calidad de la señal.

Por otra parte, un sistema de evacuación por voz tiene que cumplir la normativa EN 54. Esta normativa establece en sus diferentes partes unos métodos de verificación para los diferentes elementos que componen el sistema.

Para la evaluación de los sistemas de amplificación que forman parte de un sistema de evacuación por voz se utiliza el estándar europeo EN 54-16, el cual en su clausula 16.1.5 establece: “*All voice alarm output circuits and transmission paths shall be connected to cables and equipment or to dummy loads. At least one of each type of voice alarm output circuit shall be loaded to its maximum capacity within the manufacturer’s specification.*” Esto implica que cuando se realiza la evaluación que establece la potencia disponible en el amplificador solo hace falta que un canal del amplificador esté operativo. Esta evaluación es muy probable que no refleje el uso real del sistema de amplificación el cual es más que posible que todos los canales de salida estén operativos y funcionando simultáneamente. Además, esta evaluación se realiza con una señal de seno de 1kHz.

Por otra parte, para verificar la inteligibilidad de los sistemas se utiliza el método descrito en el estándar EN 60268-16:2020 en el cual se pueden utilizar dos metodologías diferentes: Directo (señal STI-PA) o indirecto (Ruido rosa con Espectro Male + Swept Sine). En ambos casos las señales son diferentes a la utilizada para la evaluación de potencia de los sistemas de amplificación.

La tercera parte de este escenario es la señal que en realidad van a reproducir los sistemas de evacuación por voz. En este caso estamos hablando de señales de habla, Estas señales tiene dos características fundamentales:

- Toleran muy bien la compresión y distorsión sin afectar a la inteligibilidad.

* **Autor de contacto:** Alberto.fueyo@wsp.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

- Tiene unos factores de pico muy elevados con periodos muy cortos en los cuales presentan valores de voltaje muy altos.

Las 3 señales, ya que la señal de STI-PA y ruido rosa son similares, se deben evaluar de forma separada y valorar las consideraciones a tomar durante el proceso de predicción, especificación y verificación de un sistema de evacuación por voz.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES

Para entender las diferencias de las 3 señales antes mencionadas se evalúa el factor de pico.

El factor de pico se entiende como la ratio, dB, entre el valor de voltaje pico y el valor RMS de la señal en el dominio del tiempo.

El factor elemento limitante del nivel de potencia acústica en un sistema de megafonía suelen ser los sistemas de amplificación debido a los “rails” que limitan los valores de pico de la señal de entrada. Por tanto, el “valor RMS alcanzable” en un sistema de megafonía depende de la estructura interna de ganancias de voltaje y del valor inicial RMS de la señal de entrada, y, en un sistema en el cual no se varía la estructura de ganancias, con 3 señales de entrada de diferentes valores RMS y pico es de esperar que se produzcan diferentes valores RMS de salida y por tanto diferentes niveles de potencia sonora.

Para conseguir un valor de RMS más alto se puede comprimir la señal y reducir el factor de pico, el problema es que esa compresión crea una distribución inestable de las fases que cuando se filtra el factor de pico se restablece^[1]. Por ejemplo, una señal de ruido rosa con un factor de pico de 12dB, con una compresión que permita reducir el factor de pico a 6dB, una vez filtrada con un filtro paso alto, el factor de pico se restaurará a 12dB.

La señal de STI-PA, utilizada para medir el STI de los sistemas de megafonía, tiene un factor de pico de 14dB, la señal de seno de 1kHz tiene un factor de pico de 3dB y el ruido rosa tiene una señal de pico de 12dB.

Respecto a las señales habladas, el factor de pico depende del hablante. En este caso se puede aplicar la media que está alrededor de 15dB de factor de pico, lo cual y debido a los ajustes de +3dB acorde con el estándar EN 60268:2021 es equivalente a un factor RMS de 12dB. Si bien como antes se ha referenciado, las señales del habla soportan muy bien la distorsión y compresión sin que la inteligibilidad se vea afectada. Se ha establecido una señal de 11dB de factor de pico lo aceptable para sistemas de megafonía, que representan un factor de pico de 8dB en una señal de ruido rosa o similares.

3. NIVEL DE POTENCIA SONORA

Para contextualizar el efecto de los diferentes factores de pico en el nivel de potencia sonora resultante del sistema, se han

normalizado las señales a un límite de “rail” de los sistemas de amplificación de 3dB, esto es el “headroom” de los sistemas de amplificación.

De esa normalización se han obtenido la diferencia en decibelios en la señal de salida, y su equivalencia en potencia eléctrica.

La figura 1 es una representación gráfica de dicha normalización.

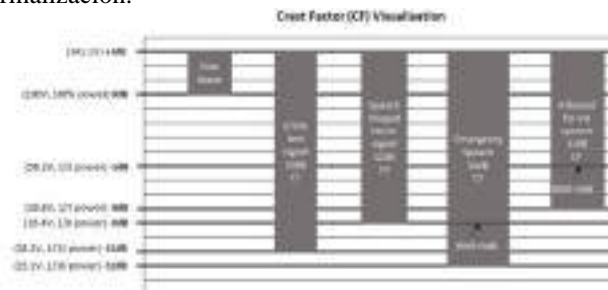


Figura 1. Visualización del valor de pico y potencia de cada señal.

4. FACTOR DE PICO VS COMPRESIÓN

En 2012 en un artículo del AES^[1] se investigaba el efecto del filtrado paso alto sobre diferentes señales de audio que previamente había sido comprimidas. Es común que los sistemas de voltaje constante utilizados en megafonía tengan un filtro paso alto a la salida de los sistemas de amplificación. En el artículo se investigaba dicho efecto en señales de ruido rosa, y música, pero no de habla, por tanto, se debe evaluar el efecto en este tipo de señales.

Partiendo de una señal de 15 dB de factor de pico y la misma comprimida hasta los 11dB de factor de pico se han filtrado con un filtro paso alto Butterworth de 4to orden y frecuencia de corte 80Hz. La tabla 1 muestra los resultados utilizando Adobe Audition.

Tabla 1. Factor de pico cuando la señal del habla es filtrada.

Señal	Factor de pico (CF)
Habla de 15dB CF	15
Habla de 15dB CF + HPF	16
Habla de 11dB CF	11
Habla de 11dB CF + HPF	15

Por tanto, el efecto del filtrado sobre el aumento del factor de pico en señales comprimidas se produce igual en las señales de habla.

5. COMPRESIÓN VS INTELIGIBILIDAD

Se ha visto que para obtener un alto nivel de potencia sonora en un sistema de amplificación una solución es utilizar señales comprimidas reduciendo así su factor de pico. Si bien

esta solución depende de cómo de flexible es el sistema de amplificación con los valores de pico fuera de los “rails” del sistema. En caso de que el sistema tenga esa flexibilidad, en teoría podríamos utilizar señales comprimidas para la evaluación y el uso final del sistema de megafonía, y se podrían conseguir valores más altos de potencia sonora sin necesidad de aumentar el número de amplificadores o la capacidad del sistema.

Ahora bien, como afecta la compresión de las señales a la inteligibilidad o los resultados durante la verificación es algo que se ha investigado ^[2].

5.1. Señales del habla

Por una parte, se debe evaluar cómo afecta a la inteligibilidad la compresión de las señales del habla. No se debe de confundir la percepción de la calidad de la señal con la inteligibilidad. Un claro ejemplo son las señales de los megáfonos portátiles que si bien la calidad de la señal es discutible, sí que es inteligible.

En 2011 se realizó en AMS Acoustics una investigación ^[3] sobre la compresión que podía soportar una señal hablada antes de que fue notable. Dicha investigación concluyó que una señal hablada podía ser comprimida hasta un factor de pico de 11dB antes de los oyentes acusasen dicha compresión.

En 2014 Morales L. ^[2] planteo otra hipótesis en la cual se evaluaba mediante “listening tests” la afectación de la inteligibilidad en señales comprimidas del habla. En dicha investigación se determinó que una señal hablada podía ser comprimida hasta tener 8dB de factor de pico sin que la inteligibilidad se viese afectada.

5.2 STI-PA

Cuando un sistema de megafonía se verifica, se pueden utilizar dos métodos: Indirecto o STI-PA.

En el caso del primero se determina el nivel de presión sonora con el uso de una señal de ruido rosa adecuada al espectro definido en el standard y la matriz de función de transferencia (MTF) se determina con el uso de un barrido de senos. Este método necesita un post procesamiento de las señales para determinar el STI.

En el segundo caso (STI-PA) es una señal pseudorandom que permite determinar el STI en el momento de las mediciones. Para usar este método, durante las mediciones se debe reproducir la señal de STI-PA al mismo nivel de presión sonora que sea va a reproducir la señal del habla (+3dB).

Por tanto, si se ha determinado que la señal del habla y el sistema puede reproducir una señal comprimida de 11dB de factor de pico, la señal de STI-PA debe reproducirse con un factor de pico de 8dB.

En la misma investigación ^[3] se evaluó que el STI se ve altamente afecta cuando la señal de STI-PA se comprime y

por tanto no se correlaciona con la inteligibilidad real del sistema.

Esta falta de correlación se puede solucionar realizando las mediciones a un nivel de presión sonora menor al diseñado y sin compresión en la señal de STI-PA. Dicho método requiere un post procesamiento de la señal y por tanto se pierde esa inmediatez de obtención del resultado de STI.

6. IMPLICACIONES EN LOS DISEÑOS

Todas estas variables tienen una implicación directa durante el proceso de diseño, especificación, verificación y uso del sistema. Se debe entender todas las implicaciones para optimizar el sistema de megafonía, hay que recordar que para conseguir 3dB más de potencia sonora se debe duplicar la potencia eléctrica y muy probablemente duplicar el número de sistemas de amplificación que conforman el sistema.

En las fases iniciales del diseño de un sistema de megafonía se debe establecer el nivel de presión sonora requerido, para aplicaciones de evacuación por voz suelen ser, al menos, de 87dB, si bien depende del ruido de fondo.

En el software de simulación acústica se deben introducir parámetros como la señal de entrada y el “headroom” que permitimos al modelo, en este punto es cuando la definición de la señal de entrada y de la capacidad del sistema de amplificación se debe tener en cuenta ya que se puede estar subestimado o sobrestimando el nivel de presión sonora del sistema. En el caso de subestimarlo se habría sobredimensionado el sistema, por el contrario, en el caso de sobrestimarlo el sistema no alcanzaría los niveles de presión sonora requerido y por tanto se necesitaría volver a diseñar el sistema. En ambos casos el sistema no se puede considerar correctamente diseñado.

Por último, una vez que el sistema de megafonía esté instalado, se debe verificar la inteligibilidad, en este punto se debe de tener en cuenta las limitaciones de los métodos de verificación y las implicaciones que puede tener en los resultados finales de STI cuando se utilizan señales comprimidas.

7. CONCLUSIÓN

El uso de diferentes señales durante las fases que conforman el diseño, instalación y verificación de un sistema de megafonía hace que se deba de entender y tener en cuenta las limitaciones e implicaciones de cada una de las señales.

Se puede optar por una aproximación conservadora al problema y optar por asumir un “headroom” elevado durante la fase de modelización para asegurarnos que las señales no se comprimen durante el proceso de verificación. Esta aproximación conservadora es muy posible que resulte en sistemas de megafonía sobredimensionados y con problemas para alcanzar el nivel de presión sonora requeridos.

Por otra parte, se puede ir a una aproximación menos conservadora, optando por un “headroom” en el modelo

acústico más ajustado, si bien esto permite un diseño más eficiente del sistema se deben de tener en cuenta todas las limitaciones que involucran al sistema en sí mismo y al uso de las señales de verificación y eso cotidiano del sistema.

8. REFERENCIAS

- [1] AES standard for acoustics – Methods of measuring and specifying the performance of loudspeakers for professional applications – Drive units, AES2-2012, Audio Eng. Soc., Annex B, (2012).
- [2] Morales L. (2014) “Validation and optimization of the Speech transmission Index for the English Language” London South Bank University.
- [3] Nicolaidis C. (2011) “How compression affects intelligibility” AMS Acoustics.

CARACTERIZACIÓN DE FUENTES DE RUIDO Y VIBRACIONES DE UNA MÁQUINA ENFRIADORA INDUSTRIAL

Amadeu Segura Torres^{1}*

Pere Vicenç Rodríguez Sorribes¹

¹ICR, Ingeniería para el Control del Ruido S.L., C/Berruguete 52, 08035 Barcelona, España

RESUMEN

Cada vez más, el ruido y las vibraciones de un equipo industrial se tienen en cuenta como parte de su diseño. En este caso que nos ocupa se realizó un estudio acústico de una enfriadora industrial con el fin de caracterizar el ruido debido a su funcionamiento normal, estudiar su origen y proponer posibles cambios/soluciones para conseguir niveles de ruido más bajos de forma que estos cumplieran con las especificaciones definidas por el cliente.

Se han realizado varias pruebas de ruido y vibraciones en la enfriadora en las instalaciones del cliente (Confidencial), incluyendo el uso de tecnologías avanzadas como ATPA (Advanced Transfer Path Analysis) y Scan&Paint, que permitieron diferenciar claramente la contribución estructural y aérea de cada uno de los elementos constituyentes de la enfriadora.

En el artículo, se presenta brevemente la metodología ATPA utilizada para determinar el ruido y vibraciones a nivel estructural de la enfriadora, así como los resultados.

ABSTRACT

Increasingly, the noise and vibration of industrial equipment is being considered as part of its design. In this case, an acoustic study of an industrial cooler was carried out in order to characterise the noise due to its normal operation, study its origin and propose possible changes/solutions to achieve lower noise levels so that they comply with the specifications defined by the client.

Several noise and vibration tests have been carried out on the cooler the customer's premises (Confidential), including the use of advanced technologies such as ATPA (Advanced Transfer Path Analysis) and Scan&Paint, which allowed to clearly differentiate the structural and aerial contribution of each of the chiller's constituent elements.

In the article, the ATPA methodology used to determine the structural noise and vibrations of the cooler, as well as the results, are briefly presented.

Palabras Clave— TPA, Ruido, Vibraciones, Industria.

* **Autor de contacto:** amadeusegura@icrsl.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha realizado un estudio acústico de un enfriador industrial con el fin de caracterizar el ruido de funcionamiento de la máquina y estudiar su origen.

La tarea ha consistido en realizar distintas pruebas en la máquina en las instalaciones del cliente con el uso de micrófonos y acelerómetros. A continuación, se explican las pruebas realizadas y se presentan los datos y su análisis para determinar las principales fuentes de ruido.

Los resultados muestran buena correspondencia entre el ensayo realizado con el método ATPA (Advanced Transfer Path Analysis) para obtener la contribución de las fuentes de ruido estructural de la máquina (paneles exteriores) y las mediciones dinámicas en operación.

El funcionamiento del refrigerador consiste en la circulación de aire movido por dos ventiladores a través de un circuito cerrado de conductos con fluido en ciclos de compresión y expansión. La compresión del fluido se realiza mediante un compresor que se encuentra en el interior de la máquina.

En la Figura 1 se puede ver un ejemplo del tipo de máquina estudiada, que no se corresponde con la máquina real, por no tener el permiso del cliente para mostrarla. La altura de la máquina real es de 2 metros y todos los paneles son de chapa metálica. Igual que en la imagen, durante los ensayos la máquina se encontraba aislada vibratoriamente del suelo por mediante de soportes elásticos.



Figura 1. Ejemplo de máquina enfriadora de aire.

2. MÉTODO ATPA

El ATPA caracteriza la topología del sistema mecánico para averiguar las trayectorias vibroacústicas y las contribuciones de los componentes del sistema, denominados subsistemas, al ruido en cualquier receptor.

Este método funciona a partir del cálculo o medición de los coeficientes de la matriz de transferencia global TG (o también GT) definidos en [1]:

$$T_{ij}^G = \frac{x_j}{x_i} \quad (1)$$

donde x_j es la señal en el nodo j habiendo aplicado una excitación x_i en el nodo i . De forma general, las señales medidas son aceleraciones y presiones

Así pues, la matriz de transferencias globales entre todos los subsistemas relaciona el ruido medido debido a la transmisión de las vibraciones por todos los caminos posibles, habiendo introducido una excitación en el sistema. Por otro lado, la matriz de transferencias directas TD (o DT) se calcula para caracterizar los caminos por los cuales se transmite la vibración. Los coeficientes de esta matriz contienen la información sobre las vías de transmisión entre dos subsistemas, bloqueando todo el resto. La transferencia directa también se puede definir como la relación entre la vibración de cualquier subsistema y un receptor acústico externo en el punto T, impidiendo la vibración de cualquier subsistema que no sea el excitado:

$$T_{iT}^D = \frac{p_T}{x_i} \quad (2)$$

Esta situación de bloquear todos los subsistemas excepto el que se excita y el que recibe la excitación raramente se puede medir directamente, ya que impedir la vibración de los subsistemas a decisión propia no es posible en la mayoría de situaciones. Por ello, la matriz de transferencias directas requiere un postproceso de los datos.

La presión acústica total (p_T) en el receptor T se puede formular como:

$$p_T = \sum_{i=1}^N x_i T_{iT}^D \quad (3)$$

donde p_T es la señal en el receptor, x_i es la señal medida en el subsistema i (por ejemplo, la aceleración de un panel que vibra), TD es la función de transferencia directa entre los subsistemas y el receptor y N es el número de subsistemas en que se ha dividido el sistema mecánico. Además, la relación entre la matriz de transferencia global y la matriz de transferencia directa se define como [2, 3]:

$$\sum_{j=1}^N T_{ij}^G T_{jT}^D = T_{iT}^G ; i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Entonces, la caracterización de las vías de transmisión se reduce a un problema matemático de determinar los

coeficientes de la matriz de transferencia directa entre los subsistemas y el receptor. La ecuación (4) se trata de un sistema lineal de N ecuaciones con N incógnitas.

De esta forma, el ATPA puede sintetizar el ruido estructural de los subsistemas de la máquina (paneles) y diferenciar entre la contribución de los distintos subsistemas.

El ensayo con el método ATPA tiene dos variantes: coherente y energético. En el caso coherente, las contribuciones se obtienen teniendo en cuenta el módulo y la fase de las señales. Por lo contrario, la variante energética utiliza los valores escalares de las señales que son representativos de la energía del sistema. En el caso que nos ocupa se ha utilizado este último caso.

3. MEDICIONES DINÁMICAS EN OPERACIÓN

Las mediciones dinámicas en operación se realizaron en situación de funcionamiento nominal: 770 rpm de velocidad de rotación de los ventiladores y 78 rps de velocidad de rotación del compresor.

Se ha situado un micrófono en la parte frontal de la máquina (delante de los ventiladores) a 2,5 metros de distancia y a una altura de 1,5 metros con un paraviento para evitar la influencia del flujo directo de aire de los ventiladores.

El ruido generado por la máquina se ha analizado como la presión acústica medida en este micrófono receptor exterior en dBA.

Se han realizado 3 tipos de mediciones: en condiciones normales, quitando las aspas de los ventiladores y reproduciendo el ruido del compresor desde el interior de la máquina.

3.1 Condiciones nominales

En condiciones nominales la presión acústica registrada en el micrófono receptor situado en la parte frontal de la máquina enfriadora ha sido de 64,0 dBA.

3.2 Sin ventiladores

Para esta prueba se han quitado las palas de los ventiladores, con lo cual se ha eliminado la circulación de aire a través de la máquina y su ruido asociado. En estas condiciones la máquina ha sido puesta en marcha en funcionamiento nominal.

La presión acústica alcanzada en el micrófono receptor exterior en esta situación ha sido de 49,2 dBA.

3.3 Ruido del compresor

El ruido de compresor ha sido grabado en condiciones nominales con un micrófono de control desde el interior de la máquina. Este ruido básicamente se describe como un tono a 78 Hz que es la velocidad de rotación del compresor. Luego,

esta grabación ha sido reproducida con un altavoz desde la localización del compresor alcanzando la misma presión acústica en el micrófono de control que en condiciones nominales.

En esta situación la presión acústica alcanzada en el micrófono receptor exterior ha sido de 42,3 dBA.

4. METODOLOGÍA DE ENSAYO ATPA

En este apartado se presenta una explicación de la metodología ATPA aplicada al estudio del ruido estructural de la máquina enfriadora. Se define el área de estudio, se enumeran los subsistemas y se describe el ensayo ATPA.

4.1. Área de estudio

El estudio se centra en la contribución estructural al ruido total de la máquina enfriadora, por lo cual, se han instrumentado todos los paneles exteriores con acelerómetros. Así pues, en este caso, el ATPA se realiza para averiguar cuál es la contribución de los paneles del refrigerador al ruido total registrado en el exterior de la máquina, sin analizar las trayectorias de la vibración. La máquina se divide en partes o subsistemas, controlando el ruido radiado por cada uno de ellos.

4.2. Lista de subsistemas

Cada panel de la máquina se divide en varios subsistemas en función de su tamaño y en cada división se coloca un acelerómetro. También en el lateral izquierdo y en la parte trasera, donde no hay panel sino una rejilla abierta, se coloca un micrófono para controlar el ruido procedente de estas aberturas.

En total, el radiador se instrumenta con 13 acelerómetros y 3 micrófonos (las dos oberturas y el micrófono de control frontal). La lista de los subsistemas utilizados para las mediciones se muestra en la siguiente tabla, donde la primera columna tiene el número del subsistema, la segunda columna tiene el nombre del subsistema y la tercera, su descripción

Tabla 1. Lista de subsistemas.

Nºsubsistema	Nombre	Descripción
01	Panel-LeftFrontTop-01	Parte superior del panel con los ventiladores
02	Panel-LeftFrontCenter-02	Parte central del panel con los ventiladores
03	Panel-LeftFrontLow-03	Parte inferior del panel con los ventiladores

04	MotorTop-04	Carcasa del motor del ventilador superior
05	MotorLow-05	Carcasa del motor del ventilador inferior
06	Panel-RightFrontTop-06	Parte superior del panel frontal
07	Panel-RightFrontLow-07	Parte inferior del panel central
08	Panel-RightTop-08	Parte superior del panel lateral derecho
09	Panel-RightCenter-09	Parte central del panel lateral derecho
10	Panel-RightLow-10	Parte inferior del panel lateral derecho
11	Panel-BackRightTop-11	Parte superior del panel trasero
12	Panel-BackRightLow-12	Parte inferior del panel trasero
13	Roof-13	Panel superior
14	LeakBack-14	Apertura trasera (micrófono)
15	LeakLeft-15	Apertura izq. (micrófono)

En la Figura 2 se puede ver un croquis con la localización de los micrófonos y en la Figura 3 se observa parte de la instrumentación.

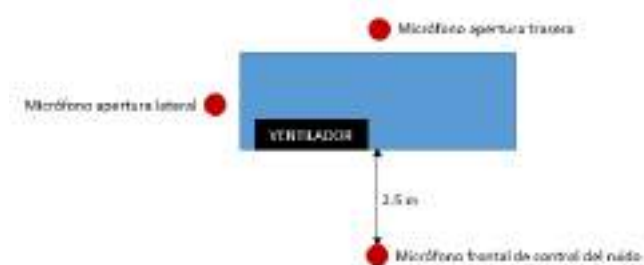


Figura 2. Croquis de la localización de los micrófonos.



Figura 3. Instrumentación

5. ENSAYO ATPA

La instrumentación se compone de acelerómetros y micrófonos, los cuales representan los subsistemas y los receptores, respectivamente.

- Subsistemas: se coloca un acelerómetro en cada uno de los paneles exteriores de la máquina que se quiere controlar.
- Receptores: se sitúa un micrófono en cada punto receptor.

En primer lugar, se realiza un ensayo estático que consiste en dar varios impactos con un martillo en los paneles considerados como subsistemas. El panel donde se impacta se nombra subsistema de referencia. La respuesta vibratoria se mide en todos los otros paneles (aceleración) y en los receptores (presión acústica). Con este ensayo se obtiene la función de transferencia global (GTF o TG).

En segundo lugar, se lleva a cabo un ensayo dinámico que consiste en grabar la aceleración y la presión acústica en todos los subsistemas y receptores mientras la máquina enfriadora se encuentra en operación.

Por último, se realiza un postproceso de los datos para obtener las funciones de transferencia directa (DTF o TD) y poder calcular la contribución al ruido en el receptor de cada uno de los paneles por separado y en total.

6. RESULTADOS DEL ATPA

La contribución de cada uno de los subsistemas controlados se muestra en la Figura 4, en dBA, así como se presenta, en la Figura 5, la síntesis en tercios de octava comparada con el espectro de frecuencias del ruido en el micrófono frontal de control.



Figura 4. Contribución estructural de los paneles en el micrófono frontal

Se observa como la contribución del ruido estructural (paneles) y las aperturas del radiador es de 49,2 dBA, que no justifica la presión sonora registrada en el micrófono frontal de control durante el funcionamiento de la máquina en condiciones nominales, 64,0 dBA. Este resultado indica que la rotación de los ventiladores, no controlada durante el ensayo del ATPA, es la principal fuente de ruido producido por la máquina refrigeradora.

La única banda de frecuencia en la que el ruido está totalmente justificado por la vibración estructural es a 80 Hz, que coincide con la frecuencia de rotación del compresor. Se puede ver que el panel que más contribuye al ruido es el panel de la parte frontal, que cubre la cavidad del compresor. En las demás bandas de frecuencia hay grandes diferencias entre el ruido relacionado con la vibración estructural y el nivel de presión sonora en el micrófono de control.

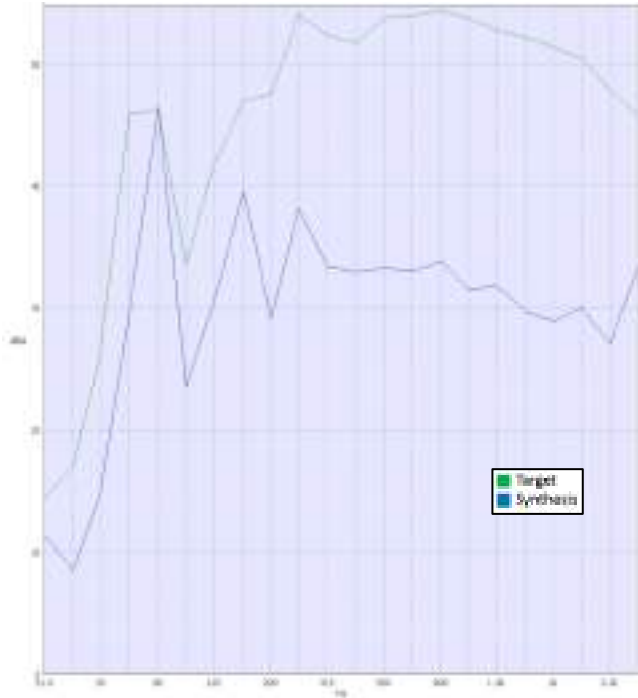


Figura 5. Espectro la síntesis de la contribución de los paneles al ruido registrado en el micrófono frontal (*target*).

No obstante, observando el nivel de presión sonora en el micrófono frontal de control durante la prueba dinámica sin los ventiladores, se detecta que el ruido registrado coincide exactamente con el cálculo con el método ATPA del ruido estructural. Este hecho valida completamente el resultado del ensayo ATPA y confirma lo dicho anteriormente: la rotación de los ventiladores es la principal causa del ruido producido por la máquina refrigeradora.

Tabla 2. Resultados

	Funcionamiento en condiciones nominales de la máquina refrigeradora sin ventiladores	Cálculo ATPA del ruido estructural
Presión sonora [dBA]	49,20	49,24

7. CONCLUSIONES

Se ha comprobado que el principal responsable del ruido de la máquina refrigeradora en funcionamiento en condiciones nominales es el movimiento del aire provocado por la rotación de los ventiladores.

Los resultados del ATPA en relación con el ruido estructural de la máquina se consideran precisos por el hecho de coincidir el resultado con el nivel de presión sonora

registrado en el micrófono de control con los ventiladores parados y el resto de la máquina funcionando en condiciones nominales.

Así pues, se determina que el cálculo del ruido estructural mediante el ATPA es un método válido para obtener la radiación sonora relacionada con la vibración de los paneles de una máquina.

8. REFERENCIAS

- [1] Aragonès, À., Poblet-Puig, J., Arcas, K., Rodríguez, P. V., Magrans, F. X., & Rodríguez-Ferran, A. (2019). Experimental and numerical study of Advanced Transfer Path Analysis applied to a box prototype. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114, 448-466
- [2] Magrans, F. X. (1981). Method of measuring transmission paths. *Journal of Sound and Vibration*, 74(3), 321-330.
- [3] Magrans, F. X., Poblet-Puig, J., & Rodríguez-Ferran, A. (2017). The solution of linear mechanical systems in terms of path superposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 111-125.



18 - 20 OCTUBRE 2023
ESCUELA POLITÉCNICA DE CUENCA
UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA MANCHA (UCLM)

PSA-1 Nuevos métodos PSA y aplicaciones de IA.



DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE GOTEOS A PARTIR DE MODELOS SINTÉTICOS DE SU HUELLA ACÚSTICA.

Manuel A. Sobreira Seoane

AtlantTic-Research Center for Telecommunication Technologies.

Universidad de Vigo

RESUMEN

Una de las utilizadas de las técnicas de inteligencia artificial es la detección y clasificación de sonidos que pueden generar señales de alerta. En este artículo se trata con la detección de sonidos impulsivos (goteos) en entornos domésticos. La detección de sonidos generados por agua es de gran interés en entornos domésticos, al permitir detectar la posible aparición de fugas. En el caso de goteos es muy difícil obtener una base de datos que contenga la gran cantidad de casuísticas sonoras que se pueden dar en la realidad. Pensemos que el sonido generado por un goteo va a depender de multitud de factores que harán que la huella sonora del sonido generado presente grandes variaciones en función del tipo de superficie sobre la cae la gota (madera, plancha de acero, suelo cerámico, etc.), del tamaño de la gota, etc. Para generar una base de datos que recoja la gran variabilidad de la vida real, se ha partido de un conjunto de goteos reales, que se ha expandido mediante la utilización de modelos sintéticos de goteos. Se generaron tablas de entrenamiento utilizando características como la variación temporal de los coeficientes Mel (DMFCC), la kurtosis y la densidad de probabilidad de las altas frecuencias, que se emplearon para alimentar un clasificador SVM. Para la evaluación de las prestaciones del clasificador se utilizó un conjunto de prueba de goteos reales sobre superficies no contempladas en la generación.

ABSTRACT

In this paper, the problem of detection of a specific event— a drip—in the domestic acoustic scene is addressed. The detection of noises generated by water can be of great interest in domestic scenes because it can help to prevent domestic floods. In the case of drip sounds, it is quite difficult to get real sounds covering the different sound qualities that different drops may have. Their sound depends on many factors as their size, the kind of surface they hit (wood, steel), etc. One of the problems when using Artificial Intelligence techniques to detect and classify sounds is the lack of data to train the models. In order to approach real life as much as possible, a database including real sounds has been expended using synthesized. A training set has been set up using the speed of variation of the MFCC, the kurtosis and the probability density function of the high frequencies as

features to train a SVM classifier. The performance of the classifier has been tested using a data set containing recordings of real drops.

Palabras Clave— detección de sonidos, SVM, clasificación de sonidos, inteligencia artificial, características acústicas.

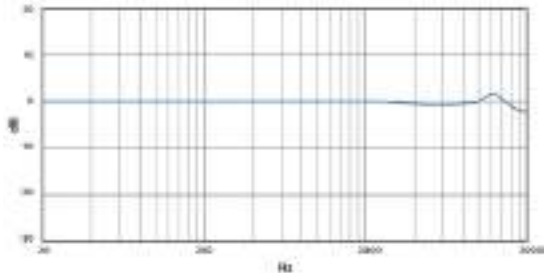
1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la detección automática de eventos acústicos está mostrando un gran incremento en el interés y actividad. Son cada vez más numerosas las publicaciones donde se tratan con la detección de sonidos en diversos entornos. Por ejemplo, Alsina et al [1] aplica los MFCC – *Mel Frequency Cepstral Coefficients* – y un clasificador SVM – *Support Vector Machine* – a la detección de múltiples sonidos en el entorno doméstico con el objetivo de monitorizar a personas de edad avanzada. En Sharma et al [2,3] se analizan distintas características acústicas, como la variación del tono o la envolvente espectral (formantes), para detectar la razón por la que llora un bebé. Jian [4] procesa el espectrograma normalizado para obtener características como la entropía. La clasificación de eventos acústicos en aplicaciones reales es una tarea desafiante y no exenta de dificultades, debido a menudo a la dificultad para obtener bases de datos con suficientes ítems y a la influencia de ruidos de fondo variables. Definimos un evento acústico, como un sonido de duración limitada en el tiempo, que por sus características se distingue del entorno acústico: el llanto de un bebé, un goteo, una puerta que se abate, etc. Los eventos acústicos en entornos reales aparecerán mezclados con diversos sonidos que formarán parte de la escena acústica.

Un sonido doméstico o una escena acústica pueden contener sonidos como música, habla, un zumbido de lavavajillas, un ruido de aspiradora, etc. En [5], se describen las estrategias y métodos a seguir para diseñar un sistema capaz de detectar y clasificar eventos en escenarios complejos. En este trabajo, se aborda el problema de la detección de un evento específico, un goteo, en la escena acústica doméstica. Para diseñar un sistema simple, se evita la necesidad de una posible separación de la fuente, con el fin de extraer el evento de interés del ruido de fondo, centrándose en la extracción de características capaces de detectar el evento específico inmerso en ruido de fondo.



(a) Micrófono i436



(b) Respuesta en frecuencia

Figura 1. Micrófono omnidireccional i436. Sensibilidad $S=44$ dB (6.3 mV/Pa) y $S/N > 63$ dB (fuente, especificaciones del fabricante en <http://www.mic-w.com/>).

La detección de ruidos generados por el agua puede ser de gran interés en escenas domésticas porque puede ayudar a prevenir inundaciones: la detección de un simple goteo puede ayudar a detectar un problema en su etapa inicial, antes de tener repercusiones mayores.

En la sección 2 de este artículo, se describe el método que se ha utilizado para generar la base de datos de entrenamiento. En la sección 3 se especifican las características acústicas utilizadas para entrenar un clasificador SVM lineal. En la sección 4, se presentan los resultados de las pruebas realizadas para presentar finalmente las conclusiones del trabajo en la sección 5.

2. LA GENERACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DE SONIDOS DE GOTEO.

Para entrenar adecuadamente un detector/clasificador de eventos acústicos se necesita una base de datos balanceada, con un conjunto suficientemente representativo de cada clase. En el caso que nos ocupa, se necesita un número suficiente de “eventos” (goteos) y un conjunto de “no eventos” que represente la variabilidad de ruidos de fondo en entornos domésticos. Para obtener la base de datos se han manejado tres fuentes de sonidos:

1. Sonidos de goteos grabados, golpeando en diversas superficies (suelo cerámico duro, madera, lavabos cerámicos, bañeras, fregaderos en aluminio y acero

inoxidable). Para introducir variabilidad en la base de datos, se grabó con distintos equipos:

- Grabaciones directas con el micrófono de un teléfono móvil.
 - Grabación desde teléfono móvil con un micrófono externo, de tipo electret, omnidireccional, de clase 2: Mic W i 436 (ver figura 1).
 - Un Edirol estéreo R-09, con micrófono de condensador.
2. Sonidos obtenidos de la base de datos de la BBC [6] (goteos de agua y sonidos domésticos variados como aspiradoras, teteras, etc.).
 3. Sonidos sintéticos: se ha recurrido a la generación de modelos sintéticos de los sonidos de goteos y mezclados con diversos ruidos de fondo domésticos.

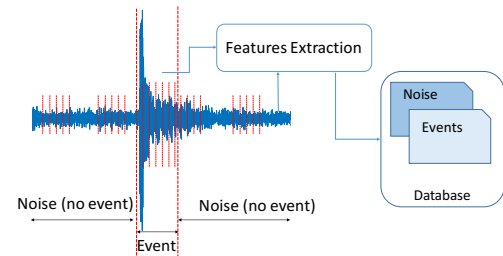


Figura 2. Extracción de características trama a trama.

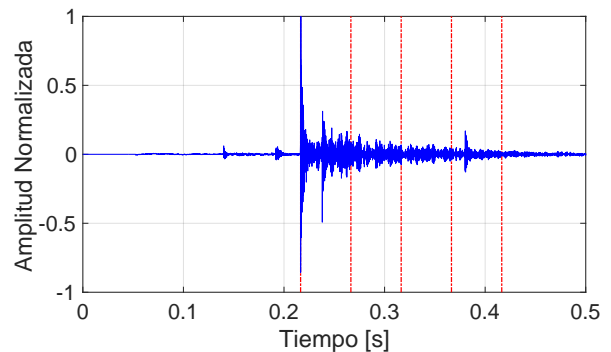


Figura 3. Señal grabada de una gota y tramas de 0.05 s.

Se ha elegido trabajar con una extracción trama a trama de las características sonoras: tal como se muestra en la figura 2, se divide la señal en tramas y se extraen sus características. Cada trama se etiqueta como “ruido de fondo” o “evento”. Como el objetivo del trabajo es detectar sonidos transitorios de corta duración, el tamaño elegido de las tramas es $t_f = 50$ ms. La frecuencia de muestreo de la base de datos es $f_s = 48000$ Hz.

Tal como se muestra en la figura 3, la duración del sonido de una gota es aproximadamente de 0.2 s, lo que supone que cada evento contiene 4 tramas de la longitud

elegida. Claramente, para relaciones Señal a Ruido bajas, el sonido de una gota puede estar enmascarado por la presencia de ruido de fondo.

2.1. Expansión de la base de datos utilizando modelos sintéticos.

Tal como se ha descrito anteriormente, el propósito de este trabajo es detectar el sonido de una gota cuando esta cae sobre una superficie, bien sobre una superficie y dura y seca o sobre agua (superficie encharcada, o cavidad con agua). El sonido percibido (timbre) del sonido radiado dependerá de las características de la gota (tamaño y velocidad de caída) y de la superficie (tamaño de la superficie y características del material). Para poder entrenar el modelo de clasificación con una muestra suficientemente representativa de goteos, es necesario expandir la base de datos cambiando las características sonoras en función de la naturaleza de la superficie.

5.1.1. El sonido emitido por gotas golpeando una superficie seca.

En este caso, el sonido emitido se deberá a la radiación de la superficie golpeada por la gota. El impacto de corta duración excita las frecuencias de resonancia de la superficie, y se puede asumir que la señal emitida estará constituida por un conjunto de caídas acústicas. Se ha optado por el modelo por utilizado por Vörlander [7],

$$p(t) = \sum_{i=1}^N \{A_i \sin(2\pi f_i) + \phi_i\} \cdot w(t) \cdot e^{-\alpha t}, \quad (1)$$

en el que las A_i son las amplitudes de cada caída, que dependerán del punto de impacto de la gota. Las f_i son las frecuencias de resonancia de la placa. ϕ_i son las fases iniciales asociadas a cada caída, dependientes también del punto de impacto. $w(t)$ es una ventana temporal utilizada para controlar la duración de las señales, ajustada empíricamente. Finalmente el factor α , es el amortiguamiento asociado a cada resonancia. Para simular en la base de datos que tanto el tamaño, el amortiguamiento y el punto de impacto son desconocidos a priori, se generan señales donde las frecuencias de resonancia, los factores de amortiguamiento, las fases y las amplitudes son variables aleatorias con distribución de probabilidad uniforme.

5.1.2. Goteo sobre agua.

Tal como se describe en Guyot et al [8] y Moss and Henhching Yeh [9], el sonido percibido de un goteo se debe a la generación de burbujas bajo el agua, un instante posterior al momento en el que la gota impacta la superficie de agua. Moos [9] propone algunos modelos que tratan con el sonido radiado por una burbuja con diferentes grados de complejidad. Para el presente trabajo se ha optado por el modelo del sonido generado por burbujas esféricas:

$$p(t) = \epsilon r_o \sin(2\pi f(t) \cdot t) \cdot e^{-\beta_o t}, \quad \epsilon \in [0.01, 0.1], \quad (2)$$

donde ϵ es un parámetro sintonizable que permite inicializar el estado de excitación de las burbujas, r_o es el radio de las burbujas (en metros) y:

- $f(t)$ es una frecuencia dependiente del tiempo que depende de la frecuencia de resonancia fundamental de la burbuja, f_o :

$$f(t) = f_o(1 + \xi \beta_o t), \quad (3)$$

donde ξ es un parámetro que ayuda a ajustar el efecto de incremento de frecuencia del sonido de una gota. Se toma el valor $\xi = 0.1$ como valor óptimo. La frecuencia de resonancia de una gota se calcula tal como sugiere Van Den Doel [10]:

$$f_o = \frac{3}{r_o}, \quad (4)$$

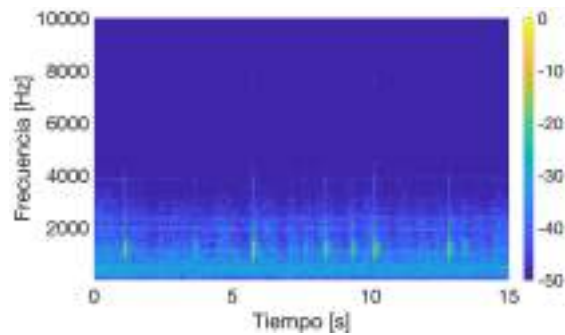
- $\beta_o = \pi f_o \delta_{tot}$ es el factor de atenuación de la caída exponencial, donde δ_{tot} es el amortiguamiento total de cada burbuja, que se calcula según se describe en [10]:

$$\delta_{tot} = \frac{0.13}{r_o} + 0.0072 r_o^{-3/2}. \quad (5)$$

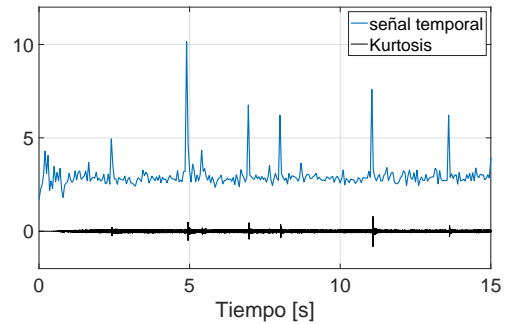
De las ecuaciones anteriores podemos deducir que el parámetro que conduce a la generación del sonido de una gota que cae sobre agua es el tamaño de esta. Tal como muestra la ecuación (2), la presión sonora generada depende del factor de atenuación y de la frecuencia de resonancia de la burbuja y ambos factores se calculan a partir del radio de la burbuja. Para expandir la base de datos con sonidos de goteos sobre agua, se ha tomado el radio como una variable aleatoria de distribución uniforme entre 0.5 y 10 mm.

2.2. La generación del conjunto de entrenamiento.

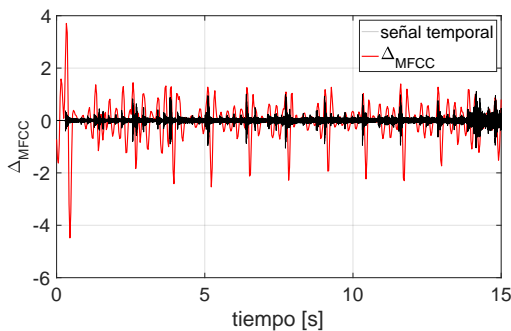
El conjunto de entrenamiento generado trata de recoger de la variabilidad de las condiciones reales. Para ello se ha generado un conjunto de 16000 tramas de goteos: 1000 tramas se corresponden con sonidos reales grabados y 15000 tramas con sonidos sintéticos generados según se ha descrito en el apartado anterior. Teniendo en cuenta que el tamaño de cada trama es de 50 ms, se ha generado una base de datos con 800 segundos de goteos. Estos sonidos se han mezclado con diversos ruidos de fondo de forma aleatoria, incluyendo distintas muestras de música de diversos géneros. De esta base de datos se extraen de forma aleatoria subconjuntos de entrenamiento, formados por unas 1000 gotas y 1000 muestras de ruido de fondo.



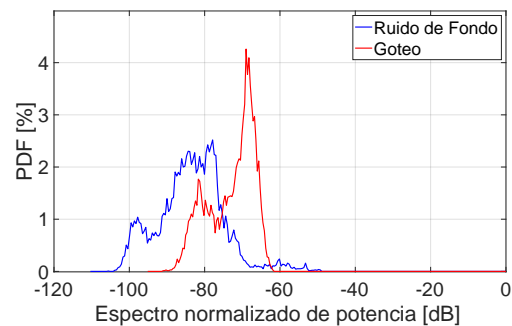
a) Espectrograma de un goteo en presencia de ruido de fondo (ruido de un aspirador doméstico).



b) kurtosis



c) Velocidad de variación de los MFCC, Δ_{MFCC} .



d) Función de densidad de probabilidad de las frecuencias altas

Figura 4. Características acústicas de 15 segundos de señal de goteo con ruido de fondo (aspiradora).

3. CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS

Una de las tareas críticas en la detección y clasificación es la selección de un conjunto apropiado de características: estas no deben introducir información redundante y deben maximizar la distancia entre clases [11,12]. Existe una intensiva descripción en la bibliografía de las diferentes características acústicas [13]. Las aproximaciones más comunes en la detección de eventos acústicos trasladan características que han sido utilizadas con éxito en la señal de voz a la clasificación de eventos acústicos. Por ejemplo, los coeficientes cepstrales en el escala Mel (MFCC) y otras características basadas en la representación de la señal en escala Mel (como los *logarithmic Mel-filter bank coefficients—FBANK*) son habituales en la detección de eventos acústicos [14] a pesar de la reconocida sensibilidad de estos coeficientes ante ruido de fondo [15]. Para este trabajo, teniendo en cuenta el comportamiento en tiempo y frecuencia de la señal de interés, se ha optado por las siguientes características:

- La función de densidad de probabilidad de las frecuencias altas. Tal como se observa en el espectrograma de un goteo – figura 4a, las características impulsivas de este hacen que su espectro se extienda a frecuencias superiores a los 2000 Hz,

mientras que la mayoría de los ruidos domésticos concentran su energía en baja frecuencia. La figura 4 d) muestra que en el caso de un goteo es más probable obtener niveles superiores a -80 dB (espectro normalizado de potencia).

- La kurtosis: Para una trama de señal, la kurtosis se calcula como el momento estandarizado de orden 4:

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (6)$$

donde μ es la media y σ la desviación estándar del conjunto de muestras de la trama de señal. Si $k=3$, las muestras de señal estarán normalmente distribuidas, mientras que la kurtosis toma valores altos cuando dentro de la trama se presenta un transitorio. La kurtosis es muy sensible a los transitorios incluso cuando estos están enmascarados por la presencia de altos niveles de ruido de fondo. La figura 4b) muestra 15 segundos de señal y la kurtosis de un goteo en presencia de ruido de fondo. Los picos de kurtosis se corresponden con el sonido emitido por las gotas.

- Δ_{MFCC} : Se ha considerado también la velocidad de variación de los MFCC, obtenida como la diferencia

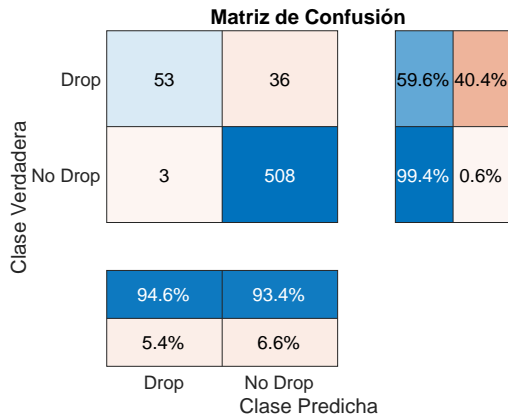
finita de orden uno entre los valores obtenidos de MFCC de dos tramas adyacentes:

$$\Delta_{MFCC}[n] = MFCC[n] - MFCC[n - 1]. \quad (7)$$

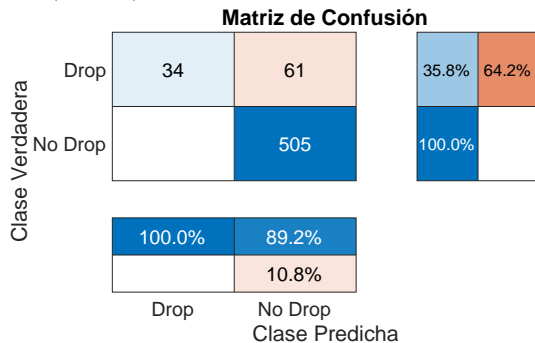
Es de esperar que en condiciones de alto ruido de fondo estacionario, la diferencia sea muy pequeña, mientras que la diferencia entre tramas será alta cuando existe un transitorio. La figura 4c) muestra la Δ_{MFCC} en el caso del ejemplo (goteo en presencia de ruido de fondo).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez seleccionado el conjunto de características a utilizar, se generan conjuntos de entrenamiento según se ha detallado anteriormente, para entrenar un clasificador lineal SVM (*Support Vector Machine*) [17,18]. Se han realizado 10 tests diferentes con diversos conjuntos de entrenamiento y test generados al azar a partir de la base de datos de referencia. Se ha obtenido la media de los resultados para evaluar las prestaciones de la detección y se ha probado finalmente el sistema con un conjunto de test grabado en condiciones reales.



a) Matriz de confusión con ruido de fondo variable (música)



b) Matriz de confusión con ruido de fondo continuo (aspiradora).

Figura 5. Matrices de confusión para dos realizaciones de prueba sobre el data set de referencia.

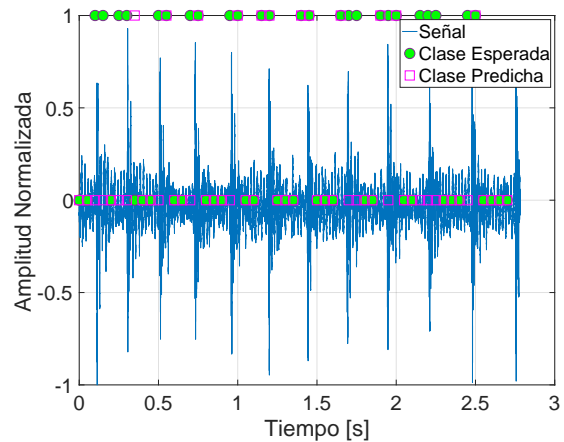


Figura 6. Detalle del resultado de la detección de gotas. S/N = 10 dB.

La figura 5 muestra dos ejemplos de ejecución del clasificador, con una duración de trama de 50 ms:

- La figura 5a) muestra los resultados obtenidos para un goteo con ruido de fondo variable. De las 600 tramas del conjunto de prueba, se detectan adecuadamente un 59% de las tramas con gotas, presentando un 0,6 % de falsos positivos, que se corresponden con pasajes impulsivos dentro del fondo musical.
- La figura 5b) muestra el caso de funcionamiento con ruido estacionario. Se observa una tasa de detección de gotas del 35 % y no se presentan falsos positivos.

La figura 6 muestra en detalle cómo funciona la clasificación sobre una señal real captada con ruido de fondo de un goteo percutiendo sobre un fregadero de aluminio. Cada gota dura aproximadamente 4 tramas, y en prácticamente todas las gotas se detecta adecuadamente una de las cuatro tramas como gotas (esencialmente debido a la influencia del ruido de fondo). Postprocesando los resultados, tomando la decisión cada 4 tramas:

1. Si no hay detección positiva en alguna de las 4 tramas, se decide que no hay gota
2. Si al menos una de las 4 tramas presenta resultado positivo, se decide que existe un goteo.

De esta forma, siempre que la tasa de detección de tramas pertenecientes a la clase “drop” sea superior a un 25 %, el sistema detectará con garantías la presencia de un goteo.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la posibilidad de detectar la aparición de goteos de agua en entornos domésticos en condiciones de ruido variable. Se generó una base de datos mínima con sonidos reales, que se expandió con señales obtenidas de modelos sintéticos. Se generaron conjuntos de entrenamiento y prueba utilizando la kurtosis, la función de

densidad de probabilidad de las altas frecuencias ($f > 2000$ Hz) y la velocidad de variación de los MFCC para alimentar un clasificador SVC. La tabla 1 muestra los resultados medios obtenidos a partir de 10 pruebas con distintas combinaciones de conjuntos de prueba y test.

	Continuous Noise	Background Music	Real Test
Accuracy (%)	93.55	90.33	72.73
Recall (%)	59.55	41.18	44.00
Specificity (%)	99.41	98.45	96.67
Precision (%)	94.64	81.40	91.67
FMeasure	0.73	0.63	59.46

Tabla 1: Medida de las prestaciones del clasificador.

Los parámetros para la evaluación de la calidad del clasificador son:

- *Accuracy*. Mide el porcentaje de tramas correctamente clasificadas sobre el total de predicciones (verdaderos positivos+falsos negativos).
- *Recall*. Mide el porcentaje de eventos correctamente clasificados (verdaderos positivos) sobre el total de predicciones.
- *Precision*. Mide la fracción de verdaderos positivos sobre el total de positivos esperados.
- F-Score. Es una media armónica de la precisión y el recall:

$$FScore = \frac{2Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (8)$$

Los resultados presentan una alta precisión y un bajo Recall lo que quiere decir que aunque un número importante de tramas que pertenecen a la clase “drop” son clasificadas incorrectamente, las detectadas son correctas con una alta probabilidad. La probabilidad de falsa alarma, por tanto, es muy baja. Los test realizados muestran que es posible implementar un detector de goteos a partir de la monitorización acústica.

12. REFERENCIAS

[1] Rosa M. Alsina Pagès, Joan Navarro, Francesc Alías, and Marcos Hervás. homesound: Real-time audio event detection based on high performance computing for behaviour and surveillance remote monitoring. *Sensors* (Basel), 17, April 2017.

[2] Shivan Sharma et al. An intelligent system for infant cry detection and information in real time. In *Seventh International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction Workshops and Demos (ACIIW)*, 2017. doi: 10.1109/ACIIW.2017.8272600.

[3] Shubham Asthana, Naman Varma, and Vinay Mittal. Preliminary analysis of causes of infant cry. In *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*

(ISSPIT), pages 000468–000473, 12 2014. doi: 10.1109/ISSPIT.2014.7300634.

[4] Jiaying Ye, Takumi Kobayashi, and Masahiro Murakawa. Urban sound event classification based on local and global features aggregation. *Applied Acoustics*, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.002>.

[5] Dan Ellis Tuomas Virtanen, Mark D. Plumbey, editor. *Computational Analysis of Sound Scenes and Events*. Springer, 2018.

[6] BBC sound effects. URL <http://bbcsfx.acropolis.org.uk/>.

[7] M. Kob and M. Vörländer. Band filters and short reverberation times. *Acustica united with Acta Acustica*, 86:350–357, 2000.

[8] Patrice Guyot. Julien Piquier, Régine André-Obre. Water sound recognition based on physical models. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing – ICASSP 2013*, pages 793–797, Vancouver, May 2003.

[9] William Moss and Hengchin Yeh. Sounding liquids: automatic sound synthesis from fluid simulation. In *ACM Transactions on Graphics*, volume 28, December 2009.

[10] Iryna Skrypnyk. Irrelevant features, class separability, and complexity of classification problems. In *IEEE 23rd International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Boca Raton, FL, USA, November 2011.

[11] Iman Khosravi, Abdolreza Safari, and Saeid Homayouni. Msmd: maximum separability and minimum dependency feature selection for cropland classification from optical and radar data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8):2159–2176, 2018. doi: 10.1080/01431161.2018.1425564.

[12] Xiaodan Zhuang et al. Feature analysis and selection for acoustic event detection. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Las Vegas, NV, USA, April 2008.

[13] Eva Vozáriková, Jozef Juhár, and Anton Cižmar. Acoustic events detection using MFCC and MPEG-7 descriptors. In *Czyzewski A. Dziech A., editor, Multimedia Communications, Services and Security. MCSS 2011. Communications in Computer and Information Science*, volume 149. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[14] Courtenay V. Cotton and Daniel P. W. Ellis. Spectral vs. spectro-temporal features for acoustic event detection. In *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)*, New Paltz, NY, USA, November 2011.

[15] Cédric Gervaise, A Barazzutti, Sylvain Busson, Y Simard, and N Roy. Automatic detection of bioacoustics impulses based on kurtosis under weak signal to noise ratio. *Applied Acoustics*, 71:1020–1026, 11 2010. doi: 10.1016/j.apacoust.2010.05.009.

[16] J.A.K. Suykens and J. Vandewalle. Least squares support vector machine classifiers. *Neural Processing Letters*, June 1999.

[17] Chih-Wei Hsu and Chih-Jen Lin. A comparison of methods for multiclass support vector machines. *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS*, 13(2), march 2002.

[18] T. G. Leighton. *The acoustic bubble*. Academic Press, 1994.

[19] B. W. Shuller. *Intelligent Audio Analysis*. Springer, 2013



A COMPARATIVE STUDY OF NEURAL MODELS FOR EMOTIONAL VOICE CONVERSION

Clara Luzón Álvarez^{1,2}

Christian Antoñanzas¹

Máximo Cobos Serrano²

¹Voicemod, S.L.

²Universitat de València

RESUMEN

La conversión de voz emocional es una tarea fundamental en el campo del procesamiento del habla, que permite la modificación del contenido emocional de un mensaje hablado mientras se preserva la identidad del hablante. Este artículo presenta un estudio comparativo preliminar de varios modelos neuronales aplicados a la conversión de voz emocional. Exploramos el rendimiento de modelos de última generación: seq2seq-EVC y CycleGAN-EVC. Para ello, evaluamos estos modelos en diversos conjuntos de datos emocionales y analizamos su capacidad para convertir con precisión emociones a lo largo de un espectro de estados afectivos. Nuestros experimentos preliminares revelan información sobre las fortalezas y limitaciones de cada modelo neuronal en la captura y transferencia de matices emocionales en el habla. Discutimos factores clave como la arquitectura del modelo, el tamaño del conjunto de datos y las estrategias de entrenamiento, arrojando luz sobre los compromisos entre la complejidad computacional y la calidad de la conversión. Además, evaluamos la calidad perceptual de la voz emocional convertida utilizando métricas subjetivas, ofreciendo una visión completa del rendimiento del modelo.

ABSTRACT

Emotional voice conversion (EVC) is a fundamental task in the field of speech processing, enabling the modification of the emotional content of a spoken message while preserving the speaker's identity. This article presents a preliminary comparative study of various neural models applied to emotional voice conversion. We explore the performance of state-of-the-art models: seq2seq-EVC and CycleGAN-EVC. To do so, we evaluate these models on various emotional datasets and analyze their ability to accurately convert emotions across a spectrum of affective states. Our preliminary experiments reveal insights into the strengths and limitations of each neural model in capturing and transferring emotional nuances in speech. We discuss key factors such as model architecture, dataset size, and training strategies, shedding light on the trade-offs between computational

complexity and conversion quality. Additionally, we assess the perceptual quality of the converted emotional voice using subjective metrics, providing a complete view of model performance.

Palabras Clave— Emotional voice conversion, deep learning, speech processing

1. INTRODUCTION

During the last few years, more and more new models that accomplish the task of Voice Conversion (VC) have appeared [1,2,3]. These models have revolutionized our ability to transform the acoustic characteristics of speech, enabling personalized voice modification for various applications. However, a notable limitation persists within the majority of these models: the inability to alter the emotional cues conveyed in speech or, in some cases, the absence of emotional cues altogether. To address this critical issue, works have emerged, seeking to achieve Emotional Voice Conversion (EVC) [4]. This transformation represents an extraordinary evolution in the way voice is manipulated, as it introduces the capability to infuse synthesized speech with a variety of emotions that go from joy to sadness, anger to affection. This transformative approach not only opens up exciting prospects for enhancing virtual assistants [5], human-computer interfaces [6], and emotion-aware communication systems [7] but also has profound implications for the entertainment and therapeutic domains [8].

The essence of EVC lies in its capacity to imbue synthesized speech with the emotional characteristics desired by a user while retaining the speaker's inherent identity. Whether it is altering a stern, businesslike tone to convey warmth and empathy in a virtual assistant or transforming a somber narration into one teeming with enthusiasm for an audiobook, EVC offers a rich palette of possibilities. Beyond the realm of entertainment and user interface design, it finds applications in therapy and counseling, where individuals may seek to control and modulate the emotions conveyed in

¹ *Autor de contacto:* clara.luzon@voicemod.net

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

their speech to improve interpersonal interactions and convey empathy effectively.

As the demand for emotionally expressive synthetic speech surges, the role of neural models in driving innovation in this field has become increasingly prominent [9]. These models, which emerged from the deep learning revolution, have demonstrated remarkable capabilities in capturing complex patterns in speech data. In this work, we present a review of two relevant works concerning neural models for EVC, including a preliminary comparative study and assessment of the perceptual quality of their outputs via user-based metrics. More specifically, we focus on two different state-of-the-art models: Seq2Seq [10] and CycleGAN [11]. The chosen models represent two different technique trends, each with its unique strengths and attributes. Seq2Seq, with its sequence-to-sequence architecture, has proven itself as a workhorse in various natural language processing tasks, VC and speech synthesis, promising intriguing possibilities for EVC. On the other hand, CycleGAN, originally designed for image-to-image translation, has been adapted to the audio domain with good results, making it an intriguing contender in the pursuit of emotional voice synthesis.

2. EMOTIONAL VOICE CONVERSION

The realm of EVC has undergone a remarkable evolution over the past few decades, transitioning from classical signal processing techniques to the transformative era of deep learning. This journey has not only broadened the horizons of what is achievable in speech processing but has also significantly enhanced the quality and expressiveness of synthetic emotional speech.

In the early stages of emotional voice conversion, classical signal processing techniques held sway. These approaches primarily relied on the manipulation of spectral features, prosody, and other acoustic attributes to convey emotional variations in speech. Techniques such as pitch modification, time-stretching, and formant shifting were commonly employed to alter the acoustic characteristics of speech. While these methods achieved some level of success, they often faced challenges in preserving the naturalness of the converted speech and maintaining the speaker's identity.

The advent of statistical parametric models marked a significant step forward in the field of emotional voice conversion. Techniques like Gaussian Mixture Models (GMMs) [12] and Hidden Markov Models (HMMs) [13] allowed for the statistical modeling of speech and emotion, providing a framework for capturing and synthesizing emotional prosody. These models could learn statistical relationships between emotional features and acoustic parameters, making them a valuable tool for voice conversion tasks. However, these models had limitations in capturing the

intricate nuances of emotional content, often resulting in a somewhat artificial-sounding output. The landscape of emotional voice conversion underwent a seismic shift with the rise of deep learning techniques. Neural networks, particularly deep neural networks (DNNs) [14], such as convolutional neural networks (CNNs) [15] or recurrent neural networks (RNNs) [16] revolutionized the field. These models offered the capacity to automatically learn complex patterns in speech data, enabling the capture and synthesis of emotional content in a more natural and expressive manner. The integration of deep learning techniques into emotional voice conversion has not only improved the perceptual quality of synthetic speech but has also expanded the horizons of what is achievable. With the ability to capture and synthesize emotional nuances, these models are poised to revolutionize various domains, from human-computer interaction to entertainment and therapy.

3. NEURAL MODELS FOR EMOTIONAL VOICE CONVERSION

In the interest of maintaining the paper's conciseness and focus on our experimental findings, we have provided condensed descriptions of the models we compare. Detailed technical specifications of each model can be found in their respective original papers, ensuring that interested readers can explore their architectures, training methods, and nuances in greater depth.

3.1. Seq2Seq-EVC

The Seq2Seq model [10] initially emerged as a solution for machine translation tasks and swiftly demonstrated its effectiveness in speech synthesis and voice conversion challenges. When integrated with attention mechanisms, it not only improves its ability to acquire feature mapping and alignment but also enables the conversion process to concentrate on emotion-relevant regions, marking a significant advancement. Another important advance accomplished with this model is the ability to train using non-parallel and limited data. This EVC framework encompasses five key components, each with distinct functions and architectures:

- *Text encoder* (Et). A convolutional layer stack, followed by a bidirectional LSTM and a fully connected layer, is orchestrated to adeptly transform textual inputs into linguistic embeddings.

- *Seq2seq automatic speech recognition (ASR) encoder*. (Er). Tasked with utilizing acoustic feature sequences for phoneme sequence prediction and automatic alignment. This encoder employs two pyramid bidirectional LSTM layers, while its attention-based decoder features a single-layer LSTM.

¹ *Autor de contacto:* clara.luzon@voicemod.net

- *Style encoder* (Es). Responsible for transmuting input acoustic feature sequences into style embeddings, this component features a configuration of stacked bidirectional LSTM layers, average pooling, and a fully connected layer.
- *Auxiliary classifier* (Cs). The auxiliary classifier plays a pivotal role in the framework, primarily focused on adversarial training to selectively remove speaker or emotional information from the linguistic space. In the author's implementation, this classifier adopts a deep neural network (DNN) architecture, meticulously designed to predict outcomes for each input embedding vector.
- *Seq2seq decoder* (Da). Crafted in resonance with the decoder architecture delineated in the Tacotron model, as referenced in [17], this component skillfully reconstructs acoustic sequences by harnessing the combined power of linguistic embeddings and style embeddings.

Table 1 serves as an overview of the structural details for each component within the framework, offering a clear and concise reference for further examination.

Table 1. Summary of the seq2seq framework architecture.

Text Encoder	Et	Conv1D-5-512-BN-ReLU-Dropout(0.5) $\times 3 \rightarrow$ 1 layer BLSTM, 256 cells each direction \rightarrow FC-512-Tanh \rightarrow Ht
Recognition Encoder	Er encoder	2 layer Pyramid BLSTM, 256 cells each direction, i.e. reducing the sequence time resolution by factor 2
Recognition Encoder	Er decoder	1 layer LSTM, 512 cells with location-aware attention \rightarrow FC-512-Tanh \rightarrow Hr
Speaker Encoder	Es	2 layer BLSTM, 128 cells each direction \rightarrow average pooling \rightarrow FC-128-Tanh \rightarrow hs
Auxiliary Classifier	Cs	FC-512-BN-LeakyReLU $\times 3 \rightarrow$ FC-99-Softmax \rightarrow P's
Seq2Seq Decoder	Da Encoder	1 layer BLSTM, 256 cells each direction
Seq2Seq Decoder	Da PreNet	FC-256-ReLU-Dropout(0.5) $\times 2$
Seq2Seq Decoder	Da decoder	2 layer LSTM, 512 cells with forward attention, 2 frames are predicted each decoder step
Seq2Seq Decoder	Da PostNet	Conv1D-5-512-BN-ReLU-Dropout(0.5) $\times 5 \rightarrow$ Conv1D-5-80, with residual connection from the input to output

Concerning the training strategy, the framework adopts a two-stage training process, summarized in Figure 1. The initial stage, termed "*style initialization*," involves the

¹ *Autor de contacto:* clara.luzon@voicemod.net

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

model's learning to disentangle speaking style from linguistic content. This stage utilizes the VCTK dataset [18], a multi-speaker TTS corpus. The subsequent phase of training, referred to as "emotion training," fine-tunes all components initialized in the first stage using emotional speech data.

During the first stage, the model takes acoustic features (80-dimensional Mel-spectrograms) and phoneme sequences as inputs. The text encoder and ASR encoder collaborate to predict linguistic embeddings from these inputs. Finally, the decoder reconstructs the data from the combined style and linguistic embeddings. Notably, the style encoder in this stage learns speaker-dependent information while effectively excluding linguistic information from the acoustic features, aided by an auxiliary classifier.

In the second stage, the previously initialized style encoder assumes the role of an emotion encoder. It embeds the acoustic features into an emotion vector. Simultaneously, the auxiliary classifier, now functioning as an emotion classifier, aids in the removal of emotion-related information from the linguistic space. This dual-stage training approach enables the model to effectively handle both style and emotion aspects, contributing to its overall performance and adaptability.

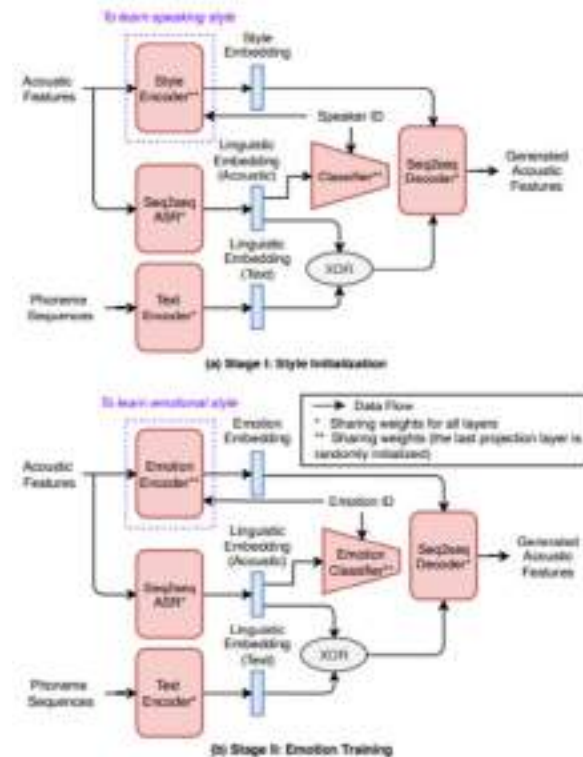


Figure 1. Seq2Seq training stages. Extracted from [10].

3.2. CycleGan-EVC

CycleGAN operates as a generative adversarial network (GAN), which consists of two neural networks, the generator (G) and the discriminator (D), engaging in a competitive learning process [11]. The generator attempts to synthesize emotionally expressive speech from one emotion domain to another, while the discriminator seeks to distinguish between real and generated emotional speech. Through adversarial training, the generator becomes increasingly proficient at converting emotions in speech, creating highly convincing emotional voice transformations.

The network architecture is concisely presented in Table 2. For the discriminator, a 2D CNN architecture is employed. In contrast, the generator was designed using a one-dimensional (1D) CNN, tailored to capture relationships among overall features while preserving the temporal structure of the speech. The network architecture incorporates a combination of downsampling, residual, and upsampling layers, along with the integration of instance normalization techniques. To achieve upsampling, the authors opted for the pixel shuffler method, known for its effectiveness in high-resolution image regeneration tasks.

The CycleGAN model incorporates three crucial loss functions, each with specific purposes that collectively guide the learning process for both forward and inverse mappings between the source and target domains, ensuring effective and consistent transformations between these two domains:

Table 2. CycleGan architecture summary.

Discriminator	D	Conv2D-[3x3]-128x2 → 1 layer glu → Conv2d - Instance Normalization- Conv2d – Instance normalization- glu X3
Generator	G	Conv1D-15-128 x 2 -> 1 layer glu → conv1d - instance Normalization – conv1d- instance Normalization -glu x2-> (Conv1d -Instance Norm – GLU-Conv1d -Instance Norm) with residual connection x6 → Conv1d-PixelShuffler-Instance Norm- GLU x2 → Conv 1d

- *Adversarial Loss:* This loss function measures the distinguishability between the data distribution of the generated data and the distribution of the source or target data. The aim is to make the generated data as indistinguishable as possible from real data. A smaller adversarial loss indicates a closer match between the generated and real data distributions, leading to more convincing results.

- *Cycle-Consistency Loss:* The cycle-consistency loss enforces a vital property in CycleGAN. It ensures that if we apply the mapping function from one domain to the other and then reverse the process, we should obtain the original data. This loss encourages the model to maintain consistency and

¹ *Autor de contacto:* clara.luzon@voicemod.net

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

fidelity in the transformations it performs, preventing undesirable artifacts.

- *Identity-Mapping Loss:* The objective of the identity-mapping loss is to preserve linguistic information during the conversion process without introducing external alterations. It aims to ensure that the core linguistic content remains unchanged in the converted data, emphasizing the importance of retaining the original meaning and semantics.

The training phase of the CycleGAN EVC framework is depicted in Figure 2. In this framework, 24-dimensional Mel-cestral features are employed for spectrum conversion training. Additionally, for prosody training, 10-dimensional F0 (fundamental frequency) features are utilized for speech frames. Notably, the prosody features are computed using the Continuous Wavelet Transform (CWT), which decomposes the F0 signal into various variations across multiple time scales. This modeling approach allows for the comprehensive representation of F0, capturing nuances from micro-prosody levels to the entirety of the utterance. During the training stage, it is important to note that both the target and source speeches originate from the same speaker. However, the emotions and linguistic content differ between these two sets of data. This distinction is a critical aspect of the training process, as it facilitates the model's ability to convert emotional characteristics while preserving the speaker's identity. Furthermore, the inclusion of the WORLD vocoder [19] (D4C edition [20]) within the framework is critical for fundamental computations. It performs spectral feature analysis, F0 estimation, and aperiodicity calculation for the input utterance. Additionally, it plays a central role in the final step of speech resynthesis following feature conversion.

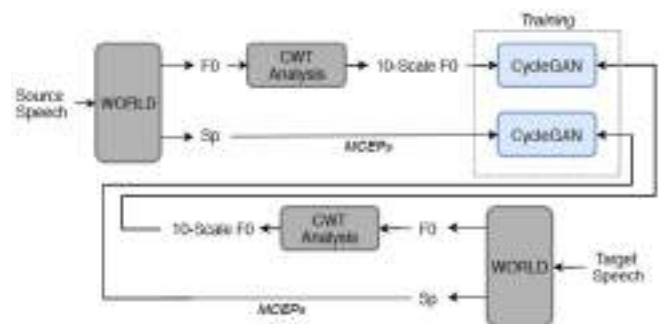


Figure 2. Training phase of CycleGAN. Extracted from [11].

4. DATASETS

In the context of EVC, the availability and quality of datasets hold a paramount position in shaping the performance and capabilities of the models. Some well-known datasets are RAVDESS [21], IEMOCAP [22], ESD [23], CREMA-D [24] and EmoV-DB [25]. Following a comprehensive review of existing emotional speech databases, we made the decision to

proceed with the Emotional Speech Databases (ESD) for the development of our comparative study. ESD is designed to address several limitations found in existing emotional speech dataset. It is characterized by its multilingual nature, containing parallel and acted emotional speech recordings. The dataset is thoughtfully constructed, featuring contributions from 10 native English speakers and 10 native Chinese speakers. Each of these speakers has provided 350 utterances, collectively covering five distinct emotion categories: Neutral, Happy, Angry, Sad, and Surprise. All the speech data in ESD database is recorded in a typical indoor environment with an SNR of above 20 dB and a sampling frequency of 16 kHz, ensuring suitability for building state-of-the-art EVC frameworks. ESD's unique combination of attributes, including its multilingual nature, diverse emotion categories, and meticulous construction, aligns perfectly with the objectives of our research.

6. EXPERIMENTS

In our evaluation, we have focused on comparing the performance of the two considered models, Seq2Seq and CycleGAN, for specific emotional conversions. Seq2Seq has been trained for the neutral-to-happy and neutral-to-sad conversions, while CycleGAN has been trained for the neutral-to-happy and neutral-to-surprise transformations. We recognize that this divergence in training pairs presents a challenge in directly comparing the two models in all aspects. The selection of these emotional transitions was motivated by the desire to assess their practical significance. Happy and sad emotional states are commonly encountered in a wide range of applications, from human-computer interaction to entertainment, while surprise and neutral serve as valuable control states for comparison. This approach allows us to directly compare Seq2Seq and CycleGAN for the neutral-to-happy conversion, offering insights into their relative performance. Additionally, we provide supplementary evaluations, showcasing Seq2Seq's capabilities in the neutral-to-sad conversion and CycleGAN's performance in the neutral-to-surprise conversion. These indirect comparisons may not facilitate a direct model-to-model assessment, but they provide valuable data on the models' adaptability to diverse emotional transitions and their ability to preserve speaker identity. While we acknowledge this limitation, our comprehensive evaluation across multiple emotional states contributes to a more holistic understanding of the strengths and limitations of these models in practical applications.

Unlike some tasks in speech processing, where a clear ground-truth or reference exists for evaluating correctness, emotional voice conversion lacks a definitive benchmark. This is due to the inherent subjectivity of emotional expression in speech. Consequently, our assessment places a particular emphasis on subjective evaluation by human listeners, who can provide valuable insights into the

naturalness and emotional expressiveness of the converted voice. While we recognize the intricacies of evaluating emotional voice conversion, our approach aims to provide a comprehensive and perceptually meaningful evaluation, acknowledging the subjective nature of the task.

To address the challenge of assessing the subjective quality of emotional voice conversion, we have devised a rigorous evaluation methodology. In our subjective evaluation, we will engage a panel of 10 human subjects, carefully selected for their diverse backgrounds and listening experiences. These individuals will play a pivotal role in providing valuable perceptual judgments of the converted speech. To ensure robust and reliable evaluations, we will employ a widely accepted metric known as the Mean Opinion Score (MOS). The MOS allows our subjects to assign numerical ratings to the quality of the converted speech, effectively quantifying their subjective perceptions of naturalness, emotional expressiveness, and overall quality. This comprehensive and well-established evaluation method, coupled with a diverse panel of evaluators, enables us to capture a broad spectrum of human perceptions, thus enhancing the reliability and validity of our subjective assessment.

5.1. Subjective Evaluation

The MOS is a standardized and widely-used method for assessing the perceived quality of audio or speech signals through subjective human evaluation. It typically employs a numerical scale, with 1 being the lowest score (indicating poor quality) and 5 being the highest (indicating excellent quality). Listeners are asked to assign a MOS rating to each converted voice sample, reflecting their judgment of the overall quality and naturalness of the speech. During the evaluation process, our panel of 10 listeners will individually assess a set of converted voice samples. Each listener will listen to multiple converted speech samples generated by the models under study, encompassing different emotional conversions. After listening to each sample, they will assign a numerical MOS rating based on their perception of the voice's quality. These ratings will be collected for each sample. To ensure consistent and reliable evaluations, our listeners have undergone a training phase. During this phase, they were familiarized with the task and the MOS scale, ensuring that they understand the range and meaning of the scores. Additionally, they were exposed to a set of reference samples representing different emotional expressions, allowing them to calibrate their perceptions and align their assessments with a common reference point. Listener training is a critical step in minimizing inter-listener variability and ensuring that evaluations are as objective as possible.

During the actual evaluation experiments, listeners were asked to assess the quality of converted speech samples. They

¹ *Autor de contacto:* clara.luzon@voicemod.net

were provided with clear and concise instructions, emphasizing that they should focus on evaluating the naturalness and emotional expressiveness of the converted speech. Specifically, they were instructed to consider aspects such as how well the emotional content was conveyed while preserving the identity of the speaker. Listeners were encouraged to provide honest and unbiased assessments, using the full range of the MOS scale to reflect their judgments accurately.

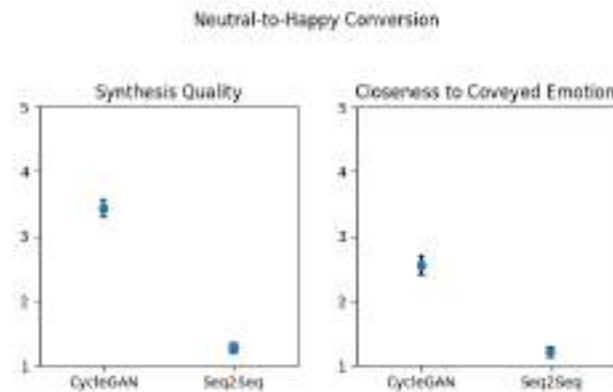
5.2. Direct Model-to-Model Evaluation: Conveying Happiness and Positive Emotions

In our evaluation, we have directed particular attention to the direct comparison of two key models, Seq2Seq and CycleGAN, with a specific focus on the neutral-to-happy emotional conversion. Both Seq2Seq and CycleGAN have undergone training for this transformation, enabling a direct model-to-model assessment. This particular emotional conversion holds significant practical relevance, as it frequently appears in applications such as enhancing virtual assistants, video games, and human-computer interfaces, where conveying happiness and positive emotions is essential. By concentrating our evaluation on this shared conversion, we gain valuable insights into the relative performance of Seq2Seq and CycleGAN, enabling a direct and meaningful comparison of their capabilities in conveying positive emotional states while preserving the speaker's identity. This focused evaluation serves as a key benchmark for assessing the models' proficiency in a commonly encountered emotional transformation, providing essential insights into their respective strengths and limitations in practical applications.

The findings from our analysis are presented in Figure 3, where the mean and standard error of the mean are used to represent the results. The graph on the right showcases the results pertaining to the synthesis quality of the two models, while the graph on the left illustrates the results related to the closeness to the conveyed emotion.

When it comes to synthesis quality, CycleGAN surpasses the Seq2Seq model achieving a more natural-sounding speech. We attribute this improvement to CycleGAN's utilization of the Continuous Wavelet Transform (CWT) applied to the fundamental frequency (f_0) and Mel-cepstral features as acoustic characteristics, in conjunction with the WORLD vocoder for audio synthesis. In contrast, the Seq2Seq model relies solely on mel-spectrograms as acoustic features and employs the Griffin-Lim algorithm for audio synthesis.

When it comes to capturing the conveyed emotion, once again, the CycleGAN algorithm outperforms the Seq2Seq model. However, it's worth noting mentioning that neither of these models appears to effectively convey the happy emotion in a readily recognizable manner.



5.3. Diverse Emotional Transformations: Assessing Model Performance Across Varied Expressions

In our evaluation, we extend our assessment to encompass scenarios where Seq2Seq is employed for the neutral-to-sad transformation, while CycleGAN is utilized for the neutral-to-surprise emotional conversion. These selected emotional transitions, though distinct from the direct comparison mentioned earlier, are equally essential in practical applications. Surprise is a common emotional state encountered in various contexts, including virtual assistants and gaming, where eliciting user engagement and responses are paramount. Conversely, the neutral-to-sad transformation finds relevance in applications such as narrative storytelling and therapeutic interventions, where conveying empathy and solemnity is crucial. While this evaluation does not permit a direct model-to-model comparison, it provides valuable insights into the adaptability and effectiveness of Seq2Seq and CycleGAN across diverse emotional transitions. By assessing their capabilities in conveying surprise and sadness while maintaining speaker identity, we gain a nuanced understanding of the models' performance in handling a range of emotional expressions, further enriching our comprehensive evaluation of their practical applicability.

The outcomes of our analysis are showcased in Figure 4, following a similar format to our previous analysis, with the utilization of mean values and standard errors of the mean. The graph on the left illustrates the results obtained from the CycleGAN model when transitioning from a neutral state to a state of surprise, while the graph on the right portrays the results from the Seq2Seq model when executing the transformation from a neutral state to a state of sadness.

The results for the CycleGAN model in terms of synthesis quality show similarities when transforming to a happy emotion compared to the surprise emotion. However, the model appears to represent the surprise emotion more effectively. We attribute this improvement to the variations in the fundamental frequency (f_0) associated with different emotions. When transitioning to happiness, the f_0 changes more rapidly, leading to higher-pitched speech, which can introduce artifacts that may mask the emotion. In contrast, the

¹ *Autor de contacto:* clara.luzon@voicemod.net

surprise emotion, while still exhibiting some of these aspects, is not as intense in terms of f_0 variations, contributing to a more accurate representation.

Similarly, for the Seq2Seq model, we observed similar results. The synthesis quality resembles that of transforming to a happy emotion, but it seems to better represent the sad emotion. This can be attributed to the same reasoning as before: sad speech typically lacks rapid fundamental frequency (f_0) variations, and the f_0 values tend to be lower compared to the happy emotion. As a result, the emotion is less likely to be masked by artifacts stemming from these characteristics, leading to a clearer representation of sadness.

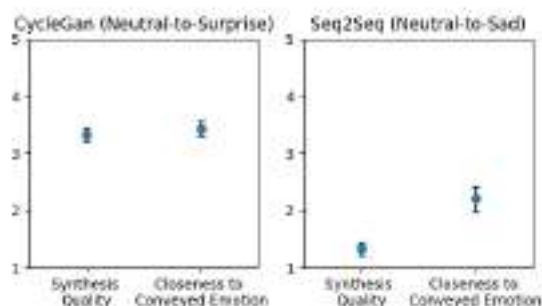


Figure 4 shows the MOS, where bars indicate the standard error of the mean, for the diverse emotional transformation evaluated by the listeners: CycleGAN Neutral-to-Surprise transformation and Seq2Seq Neutral-to-Sad transformation.

6. CONCLUSIONS

In summary, our study has explored the capabilities of Seq2Seq and CycleGAN models in the context of emotional voice conversion (EVC). Through a comprehensive evaluation, we have gained valuable insights into their performance across various emotional transformations. In a direct comparison for the neutral-to-happy conversion, CycleGAN exhibited superior ability to imbue natural and emotionally expressive qualities into the converted speech. Conversely, Seq2Seq demonstrated suboptimal synthesis quality, suggesting room for improvement. Our supplementary evaluations CycleGAN's commendable adaptability in the neutral-to-surprise transformation and revealed improvements in Seq2Seq's effectiveness in the neutral-to-sad conversion. While these indirect comparisons did not facilitate direct model-to-model assessments, they underscored the models' versatility in handling diverse emotional transitions.

However, it's crucial to emphasize that both models, when employed appropriately, offer promising avenues for enhancing applications spanning human-computer interaction, entertainment, and therapy. Notably, the absence

of a ground-truth for emotional voice conversion remains a challenge, underscoring the subjective nature of quality assessment in this field. Our employment of a Mean Opinion Score (MOS) approach, bolstered by a diverse panel of evaluators, serves as a commendable effort to address this challenge. Despite the inherent subjectivity, MOS evaluations provided robust insights into perceptual quality. As we conclude, our findings contribute to a holistic understanding of the strengths and limitations of Seq2Seq and CycleGAN in practical EVC applications. They also emphasize the need for continued research in the evolving field of emotional voice conversion, where innovation holds the promise of more emotionally expressive and identity-preserving synthetic voices.

ACKNOWLEDGEMENTS

Work partially funded by project CIAEST/2021/10 from Generalitat Valenciana and projects TED2021-131003B-C21 and PID2022-137048OB-C41 from the Spanish Ministry of Science and Innovation.

12. REFERENCIAS

- [1] B. Sisman, J Yamagishi, S. King, and H. Li, "An overview of voice conversion and its challenges: From statistical modeling to deep learning," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 29, 132-157. 2020.
- [2] Z. Wu and H. Li, "Voice conversion versus speaker verification: an overview," *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol. 3, pp. e17, 2014.
- [3] S. H. Mohammadi and A.r Kain, "An overview of voice conversion systems," *Speech Communication*, vol. 88, pp. 65-82, 2017.
- [4] K. Zhou, B. Sisman. R. Liu, and H. Li, "Emotional voice conversion: Theory, databases and ESD." *Speech Communication*, 137, 1-18, 2022.
- [5] H. J. Do, and W. T. Fu, "Empathic virtual assistant for healthcare information with positive emotional experience," in 2016 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI) (pp. 318-318). IEEE, 2016.
- [6] S. Brave, and C. Nass, "Emotion in human-computer interaction." *Human-computer interaction fundamentals*, 20094635, 53-68, 2009.
- [7] M. Chen, Y. Zhang, Y. Li, S. Mao and V. C. Leung, "EMC: Emotion-aware mobile cloud computing in 5G." *IEEE Network*, 29(2), 32-38, 2015.
- [8] K. Vijayan, H. Li and T. Toda, "Speech-to-singing voice conversion: The challenges and strategies for improving vocal conversion processes." *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(1), 95-102, 2018.
- [9] J. Lorenzo-Trueba, G. E. Henter, S. Takaki, J. Yamagishi, Y. Morino and Y. Ochiai, "Investigating different representations for modeling and controlling multiple

¹ **Autor de contacto:** clara.luzon@voicemod.net

- emotions in DNN-based speech synthesis.” *Speech Communication*, 99, 135-143, 2018.
- [10] K. Zhou, B. Sisman and H. Li, “Limited data emotional voice conversion leveraging text-to-speech: Two-stage sequence-to-sequence training”. arXiv preprint arXiv:2103.16809, 2021.
- [11] K. Zhou, B. Sisman and H. Li, “Transforming Spectrum and Prosody for Emotional Voice Conversion with Non-Parallel Training Data.” arXiv, 24 de octubre de 2020. Accedido: 12 de abril de 2023. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2002.00198>, 2020.
- [12] R. Aihara, R. Takashima, T. Takiguchi and Y. Ariki, “GMM-based emotional voice conversion using spectrum and prosody features.” *American Journal of Signal Processing*, 2(5), 134-138, 2012.
- [13] Z. Inanoglu and S. Young, “Data-driven emotion conversion in spoken English.” *Speech Communication*, 51(3), 268-283, 2009.
- [14] Z. Luo, T. Takiguchi and Y. Ariki, “Emotional voice conversion using deep neural networks with MCC and F0 features,” In 2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS) (pp. 1-5). IEEE, 2016.
- [15] H. Choi, S. Park, J. Park, and M. Hahn, “Multi-speaker emotional acoustic modeling for cnn-based speech synthesis.” In ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 6950-6954), 2019.
- [16] H. Ming, D. Y. Huang, L., Xie, J. Wu, M. Dong and H. Li. “Deep Bidirectional LSTM Modeling of Timbre and Prosody for Emotional Voice Conversion.” In Interspeech (pp. 2453-2457), 2016.
- [17] Wang, Y., Skerry-Ryan, R. J., Stanton, D., Wu, Y., Weiss, R. J., Jaitly, N., ... & Saurous, R. A. (2017). Tacotron: Towards end-to-end speech synthesis. arXiv preprint arXiv:1703.10135.
- [18] Veaux, Christophe; Yamagishi, Junichi; MacDonald, Kirsten. (2017). CSTR VCTK Corpus: English Multi-speaker Corpus for CSTR Voice Cloning Toolkit, [sound]. University of Edinburgh. The Centre for Speech Technology Research (CSTR). <https://doi.org/10.7488/ds/1994>.
- [19] Morise, M., Yokomori, F., & Ozawa, K. (2016). WORLD: A Vocoder-Based High-Quality Speech Synthesis System for Real-Time Applications. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E99.D(7), 1877–1884. <https://doi.org/10.1587/transinf.2015edp7457>
- [20] Morise, M. (2016, November). D4C, a band-aperiodicity estimator for high-quality speech synthesis. *Speech Communication*, 84, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2016.09.001>
- [21] Livingstone, S. R., & Russo, F. A. (2018). The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS): a dynamic, multimodal set of facial and vocal expressions in North American English. *PLOS ONE*, 13(5), e0196391. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196391>
- [22] Busso, C., Bulut, M., Lee, C. C., Kazemzadeh, A., Mower, E., Kim, S., Chang, J. N., Lee, S., & Narayanan, S. S. (2008). IEMOCAP: Interactive Emotional Dyadic Motion Capture Database. *Language Resources and Evaluation*, 42(4), 335-359. <https://doi.org/10.1007/s10579-008-9076-6>
- [23] Zhou, K., Sisman, B., Liu, R., & Li, H. (2022). Emotional Voice Conversion: Theory, Databases and ESD. *Speech Communication*, 137, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2021.11.006>
- [24] Cao, H., Cooper, D. G., Keutmann, M. K., Gur, R. C., Nenkova, A., & Verma, R. (2014). CREMA-D: Crowd-Sourced Emotional Multimodal Actors Dataset. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 5(4), 377-390. <https://doi.org/10.1109/taffc.2014.2336244>
- [25] Adigwe, A., Tits, N., Haddad, K., Ostadabbas, S., & Dutoit, T. (2018). The emotional voices database: Towards controlling the emotion dimension in voice generation systems. arXiv preprint arXiv:1806.09514.

¹ **Autor de contacto:** clara.luzon@voicemod.net

latente, dotando al autocodificador de las deseadas capacidades generativas. Los detalles matemáticos de estos esquemas y sus capacidades se discutieron el año pasado en este congreso, partiendo de un esquema diseñado para profundizar en la estructura de estos esquemas y las propiedades del espacio latente [16].

Aunque también existen otros enfoques, como el Procesado de Señal Digital Diferenciable (DDSP), que ha ganado atención por su capacidad para modelar y replicar efectos de audio con alta precisión [30], los VAEs se destacan especialmente en la generación y manipulación de efectos de audio. Mientras que DDSP es excepcional en la réplica precisa de efectos de audio y ha sido estudiado para simular efectos analógicos [31], los VAEs ofrecen una mayor flexibilidad para la creatividad y la experimentación, estableciendo así un equilibrio único entre fidelidad y exploración en el diseño de efectos de audio.

El avance que han supuesto los esquemas variacionales también ha desencadenado toda una serie de aplicaciones en áreas como la generación musical [17], el modelado analógico virtual [18] y la síntesis de audio [19] entre otros. En épocas recientes, las propuestas más innovadoras para crear efectos de audio vienen empleando técnicas de aprendizaje profundo y modelos generativos como los VAEs [20]. Estos se pueden potenciar con modelos de difusión, que aseguran la coherencia temporal de las muestras. En esta misma línea, trabajos como AutoFoley [14], FoleyAutomatic [2] o Deep-Modal [21] son ejemplos de condicionamiento de la generación de audio utilizando señales de vídeo, simulando el trabajo de un artista de Foley cuando sincroniza los efectos con la imagen. Paralelamente, se han desarrollado tendencias que adaptan modelos concebidos para música al ámbito de los efectos de audio [22], o que adoptan enfoques adversarios para la síntesis [23].

Un ejemplo reseñable es el autocodificador de tiempo real RAVE [1]. Este esquema propone un sistema generalista que no está limitado únicamente a la música (generación de instrumentos, voces, pasos...), y que utiliza representaciones espectrales de audio para el entrenamiento y la generación un espacio latente con las características de los audios provistos. Ha demostrado su eficacia en la generación de efectos de audio y, gracias a su integración con redes adversarias, logra una reconstrucción fiel del audio original [37].

Esta plataforma ya ha sido exhaustivamente evaluada y ha servido de inspiración para múltiples investigaciones [13][27]. Hay que tener en cuenta que, para poderse utilizar como sintetizador, se debe reconstruir la fase de la señal con precisión. La gran mayoría de los sintetizadores analizados

utilizan Hi-Fi GAN [28] como modelo de reconstrucción, aunque ya comienza a haber trabajos que introducen este tipo de información dentro del propio espacio latente [29].

3. ESTRUCTURA E IMPLEMENTACIÓN

Foley-VAE es una aplicación pensada para la generación de efectos de Foley mediante inteligencia artificial. Puesto que el abanico de efectos de Foley es virtualmente infinito, este sistema se centra en optimizar y enriquecer sonidos específicos preseleccionados. No es una herramienta para concebir efectos completamente nuevos de forma autónoma, sino que potencia la labor artística del artista de Foley, facilitando el proceso de exploración de las posibles variantes. En este capítulo presentamos el flujo de trabajo, que involucra el preprocesamiento de los audios, la adaptación del modelo de inteligencia artificial y, finalmente, la generación del efecto sonoro. El mismo flujo que describimos puede seguirse para desarrollar nuevos efectos o crear nuevas combinaciones.

3.1 Preprocesado

Una vez el artista de Foley ha seleccionado un conjunto de sonidos base adecuados para cierta escena, el preprocesado de los datos puede comenzar. En primer lugar, se segmentan los audios de longitud arbitraria en segmentos de 5 segundos y se homogeniza la frecuencia de muestreo a 44,1 kHz, que es la frecuencia de trabajo de RAVE. Posteriormente, a cada uno de estos segmentos se les aplica individualmente una gama de efectos preexistentes con parámetros aleatorizados. Esto significa que cada fragmento sonoro experimenta solo una transformación específica. Con esto generamos un conjunto de variaciones sobre el sonido original que enriquezcan la base de datos original, y que se utiliza como conjunto de entrenamiento de la IA. La lista de efectos, así como las variaciones que hemos seleccionado puede encontrarse en la Tabla 1. Se trata de cinco efectos sonoros básicos ampliamente utilizados en la industria cinematográfica. Estos se computan automáticamente con el software Reaper², utilizando un script basado en el lenguaje LUA³.

El siguiente paso es adaptar estos registros para procesarlos con nuestro VAE. Específicamente, la amplitud de la forma de onda se normaliza para que varíe entre 1 y -1 y se fragmenta el registro en N señales submuestreadas. Este submuestreo es conocido como descomposición multibanda y permite obtener diferentes precisiones en el espectro, favoreciendo nuestra capacidad para representar detalles finos y gruesos al mismo tiempo [33]. Con esto conseguimos

² <https://www.reaper.fm/>

³ <https://github.com/MateoCamara/Reaper-automatic-random-generation>

una base de datos de gran riqueza para el entrenamiento de una red neuronal.

Tabla 1. Lista de efectos y rangos aplicados

Efecto	Parámetros	Rango
Chorus	Longitud (ms)	0 – 200
	Voces	0 – 8
	Wet Mix (dB)	30 – 42
	Dry Mix (dB)	30 – 42
	Ratio (Hz)	0 – 16
	Cambio de tonos	0 – 1
Distorsión	Ganancia (dB)	10 – 40
	Dureza	1 – 10
Ecuadorador	Ganancia 1 (dB)	-5 – 1
	Ganancia 2 (dB)	-5 – 5
	Ganancia 3 (dB)	-5 – 5
	Ancho Banda 1 (oct)	0,1 – 4
	Ancho Banda 2 (oct)	0,1 – 4
	Ancho Banda 3 (oct)	0,1 – 4
Rever	Wet Mix (dB)	0 – 3
	Dry Mix (dB)	0 – 3
	Habitación	30 – 90
	Dampening	0 – 100
	Paso bajo	0 – 10mil
	Paso alto	10mil – 20mil
Flanger	Longitud (ms)	0 – 200
	Realimentación (dB)	-120 – 6
	Wet Mix (dB)	-30 – 12
	Dry Mix (dB)	-30 – 12
	Ratio (Hz)	0 – 100

3.2 Entrenamiento de la Inteligencia artificial

Como se ha señalado, el sistema de inteligencia artificial que empleamos en este trabajo se basa en el VAE de RAVE [1]. El sistema utiliza dos etapas para su entrenamiento. En primer lugar, se entrena minimizando la distancia de la señal de entrada y la reconstruida sobre las señales multiescala según se propone en [33]. De esta forma, se minimiza la diferencia en la amplitud de las señales y no se penaliza al VAE a la hora de reconstruir la fase, que potencialmente puede no tener interés perceptual y puede representar un reto aun mayor para la correcta reconstrucción. Además de este error, se incorpora la pérdida del codificador y decodificador derivada de la naturaleza gaussiana del VAE, que se minimiza a través del *Evidence Lower Bound* (ELBO) [4].

La segunda fase consiste en un refinamiento de los parámetros usando técnicas adversarias. Los creadores de RAVE sostienen que este paso potencia la naturalidad y calidad del audio generado [1]. En esta etapa se detiene el entrenamiento del codificador y solo se modifican los

parámetros del decodificador. Puesto que el espacio latente se ha definido en la etapa anterior, éste puede tomarse como la distribución base para una Red Generativa Adversaria (GAN) [34]. Es decir, se utilizan los audios decodificados procedentes del muestreo del espacio latente y se comparan con los sonidos originales utilizando un discriminador. Este discriminador tratará de discernir si el audio que se le presenta proviene del muestreo del VAE o si se trata de un audio genuino. De esta forma, cuando el esquema adversario sea incapaz de determinar si se trata de uno o de otro significará que el VAE está bien entrenado, hasta el punto de generar audios verdaderamente realistas.

Al término de estas dos etapas, el VAE está listo para generar audios similares a los originales, así como mezclas inteligentes de los anteriores. Como parte del entrenamiento, se añade un procesamiento más para descartar variables latentes que no aporten información relevante. Esto se logra descartando las que se asemejen excesivamente a la prior gaussiana del VAE. Adicionalmente, en RAVE se proyectan las variables que contienen información a un subespacio menor que concentre las características similares en una misma variable y separe las características diferentes en variables incorreladas. Este último paso permite un uso interactivo más sencillo e intuitivo del autocodificador durante la fase de generación.

3.3 Generación

Para la generación de audio se ha diseñado una interfaz interactiva. Ésta se ha desarrollado en MAX 8⁴, un software visual que permite la creación de interfaces para audio y que soporta el uso de VAEs en tiempo real. La Imagen 1 muestra una vista previa de la interfaz diseñada. Una versión *standalone* se encuentra disponible en abierto a través de la web⁵.

La interfaz permite el uso del VAE de dos formas diferentes. Por un lado, permite al usuario cargar un sonido arbitrario y utilizarlo como fuente de excitación del VAE. Es decir, introducir el sonido en el codificador, obtener una muestra en el espacio latente y decodificarlo. El sonido resultante será una modificación del timbre del original con respecto de los audios con los que se entrenó el VAE. Anecdóticamente se permite que la señal de entrada al VAE sea la entrada de micrófono, pudiendo así hacer pruebas con la voz, palmadas o silbidos, con resultados habitualmente extravagantes.

La segunda modalidad permite asignar valores exactos a las variables en el espacio latente. De esta forma se puede hacer una exploración explícita de los audios que puede crear el VAE. Este es el uso recomendado para la generación de

⁴ <https://cycling74.com/>

⁵ <https://mateocamara.com/resources/>

efectos de Foley. El usuario puede activar y desactivar las variables del VAE, modificando su valor y comprobando el sonido producido a través de la interfaz interactiva. Cuando ha encontrado un valor razonable, puede descargarlo y utilizarlo en su producción.

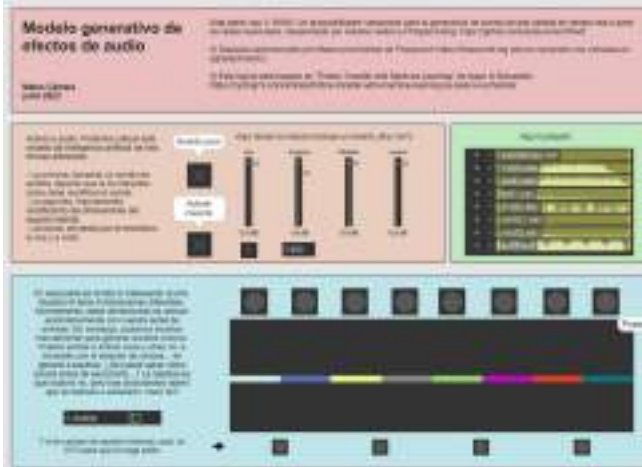


Imagen 1. Vista previa de la interfaz de Max 8 en la que se encuentra embebido el VAE.

Adicionalmente, se han incluido módulos de procesamiento digital más clásicos dentro de la interfaz diseñada, para complementar el flujo de procesamiento. Estos módulos permiten combinar las capacidades avanzadas del VAE con elementos paramétricos más controlables y conocidos. Se ha incluido un filtro paramétrico, que permite modificar la estructura frecuencial del audio generado por el VAE, modulaciones en amplitud basadas en LFOs y modulaciones en amplitud constantes que permiten simular golpes o encendidos. Aunque no se trata de un conjunto de herramientas exhaustivo, son las suficientes para demostrar cómo podemos integrar en el esquema propuesto las capacidades avanzadas de la inteligencia artificial y las más clásicas propias de las estaciones digitales de trabajo. Con todo esto, la herramienta implementada permite diseñar eficientemente una gran variedad de efectos de Foley. No obstante, siempre se puede continuar el procesamiento en nuestro software de edición preferido una vez hemos generado un audio base satisfactorio.

Por último, La interfaz permite agregar VAEs adicionales. Estos componentes adicionales se pueden utilizar para sintetizar a la vez diferentes sonidos y realizar una mezcla en tiempo real. Los audios generados por separado pueden combinarse de forma aditiva, por lo que se da lugar a relaciones entre sonidos o mezclas que físicamente sean imposibles. Por otro lado, la combinación puede realizarse directamente en el proceso de decodificación del VAE, por lo que ambas señales excitarían al mismo tiempo el espacio latente y este se descodificaría como si se tratase de una única señal. De esta forma, se logra un nivel de

abstracción superior en el sentido de que se pueden entrenar dos modelos por separado, con tipología de audio muy dispar, y generar una mezcla coherente. Sin embargo y a pesar de su potencial, esta técnica aún está siendo refinada, ya que tiende a ser inestable y computacionalmente costosa, por lo que su aplicación práctica sigue siendo un desafío.

4. EXPERIENCIAS

En esta sección, exploramos la eficacia de nuestro modelo en la generación de efectos de sonido de pasos. Este tipo de efecto es ideal para una evaluación objetiva, ya que es universalmente conocido y hay abundantes bases de datos disponibles para comparar los resultados. Los efectos de pasos también ofrecen la flexibilidad de simular tanto escenarios realistas como imaginativos, como, por ejemplo, el sonido de un paso en una superficie que sea una mezcla entre metal y agua. Además, los efectos de pasos son fáciles de alinear entre sí, ya que suelen ser explosiones de energía fácilmente identificables en el audio.

4.1 Materiales y entrenamiento

Para este estudio hemos utilizado una base de datos de pasos grabados en un estudio de Foley. Hay aproximadamente 15.000 registros de audio grabados con 16 bits de precisión a 48 kHz de frecuencia de muestreo y una duración aproximada de 30 segundos. Cada uno contiene un tipo diferente de zapatos, materiales y cadencia de paso. Para este estudio se han agrupado los sonidos en función del tipo de material en seis categorías: madera, metal, roca, tela, tierra y otros (agua, nieve...). Cada grupo contiene 120 audios y una duración total de 60 minutos.

Hemos entrenado el VAE tomando un 90% de muestras para entrenamiento y un 10% para test y validación. Para el entrenamiento se ha utilizado Pytorch 2.0.1, con CUDA 11.7 en un sistema UBUNTU 22.04 con aceleración por Hardware en GPU modelo NVIDIA GeForce RTX 3090. El modelo de nuestro VAE se entrenó durante 24 horas para evaluar los resultados del proceso de entrenamiento. El modelo final corresponde con el punto de control con menor error de validación, que se produjo a las 3 horas del entrenamiento. La Imagen 2 muestra la evolución del error (detallado en la Sección 3.2) en función del número de muestras del conjunto de entrenamiento computadas.

4.2 Espacio latente

La información sonora se encuentra embebida en un espacio latente de 128 variables. El sistema RAVE propone un método de reducción de dimensionalidad mediante la técnica de PCA sobre un subespacio de 8 variables que contienen el 95% de la información acústica (fidelidad) embebida en el espacio original. Sobre este subespacio, la Imagen 3 presenta

una reducción a dos dimensiones mediante la técnica t-SNE. Esta reducción permite tener en cuenta las características del espacio latente y ofrecer una visualización interpretable. La imagen muestra el subconjunto de test embebido en el espacio latente en función de los distintos tipos de materiales considerados; madera, roca, tela, tierra, metal y otros.



Imagen 2. Evolución del error de validación a lo largo del número de actualizaciones de pesos de la red.

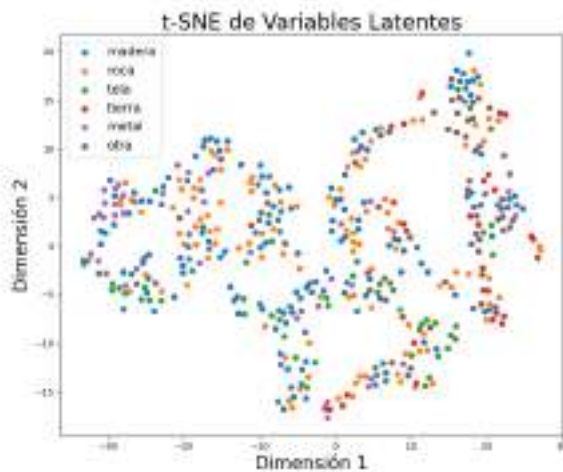


Imagen 3. Representación t-SNE del espacio latente del VAE.

En la Imagen 3 se observa un ligero agrupamiento de los diferentes tipos de materiales. La madera (azul) y la roca (naranja) se han agrupado juntos en la región superior de la dimensión 2. El motivo es que se trata de sonidos cercanos, percusivos, secos, de poco transitorio. La tela (verde) ha quedado en la región inferior de la dimensión 2, claramente separada de los otros dos tipos de materiales citados, al tratarse de sonidos suaves, más parecidos a un rozamiento que a un golpeo. El metal (morado) ha quedado claramente

separado del resto de materiales en la región izquierda, siendo el sonido con mayor transitorio. Mientras, la tierra (rojo) y resto de materiales (marrón), con sonidos acuosos, de timbre muy diferente al resto, quedan en la región derecha. La principal conclusión es que el VAE ha sido correctamente entrenado, puesto que el espacio latente parece que logra distinguir los diferentes detalles y timbres de los audios estudiados. Sin embargo, la estructura del t-SNE parecería indicar que las clases se entremezclan en el espacio latente. La primera conclusión debe corroborarse evaluando la calidad de los audios generados. La segunda analizando la estructura del espacio latente en función de sus variables.

4.3 Capacidad de generación

En esta sección se mide la capacidad de generación desde dos perspectivas. La primera es la capacidad de regeneración de un sonido. Es decir, la capacidad de recrear un sonido lo más parecido al original. Este estudio permite computar el error objetivo cometido para un registro de referencia. La segunda es la capacidad de mezcla de dos sonidos. Es decir, la generación de un audio totalmente nuevo, tomando como referencia dos audios originales. En este caso no se puede hacer una valoración objetiva al carecer de una referencia, por lo que se realiza una valoración de referencia incompleta. En todo caso, se invita al lector a escuchar y evaluar por sí mismo la calidad de los audios adjuntos a este trabajo⁶.

4.3.1 Regeneración del audio

Para evaluar la eficacia de la regeneración, se toma cada audio del conjunto de test y se procesa a través del modelo. Esto da como resultado una versión generada para cada audio original. Empleamos tres métricas diferentes para comparar la calidad del audio generado con el original: el Error Cuadrático Medio (ECM), la métrica de calidad objetiva ViSQOL, que realiza una estimación sobre la subjetiva [35], y la distancia de Fréchet (FAD), que evalúa la calidad sin necesidad de referencia [36]. Estas métricas se calculan para todo el conjunto de audios originales. Los resultados de esta evaluación se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de regeneración de audio en el VAE.

	ECM	ViSQOL	FAD
Valor	51 ± 27	$4,1 \pm 0,2$	~ 0

En esta tabla se pueden observar los resultados agregados para todos los materiales. La métrica subjetiva ViSQOL, que toma valores entre 1 (peor calidad) y 5 (mejor calidad), se encuentra cerca del máximo. La distancia FAD es mínima, indicando que los sonidos producidos son efectivamente pasos y no ruido. Por último, el valor de ECM, calculado sobre el espectrograma MEL, no demuestra la calidad del

⁶ <https://mateocamara.github.io/foley-vae/>

sonido, pero puede tomarse como referencia para futuros estudios. La imagen 4 muestra la distribución de valores obtenida para en ECM. El error es análogamente bajo en más del 85% de los registros.

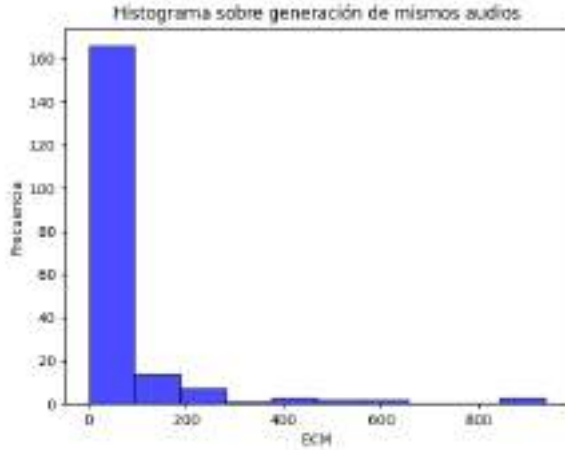


Imagen 4. Distribución de errores cuadráticos medios de la regeneración de audio en el VAE.

La Imagen 5 muestra una matriz de las distancias de Fréchet (FAD) clasificadas según el tipo de material. En general, los valores cercanos a cero indican que el audio reconstruido es de buena calidad. Hay tres aspectos que resaltan:

1. La diagonal principal de la matriz, que compara cada audio generado con su versión original, tiene valores muy bajos. Esto significa que el modelo es consistentemente bueno en recrear los sonidos originales.
2. En particular, la columna que corresponde a los registros de tipo "tierra" es especialmente singular. Aunque los valores más altos de FAD en esta columna sugieren que estos sonidos tienen un timbre muy distintivo, el bajo valor de FAD entre el sonido original y el reconstruido de "tierra" indica que el modelo VAE ha sido eficaz en capturar estos detalles únicos.
3. En general, valores bajos en toda la matriz (sin contar con la diagonal principal) indica que los sonidos son relativamente parecidos entre sí. Solamente detalles pequeños los diferencian.

4.3.2 Mezcla de audios

Para la generación de mezclas se han tomado dos audios de pasos sobre materiales diferentes. Se han sumado las representaciones latentes de cada uno de ellos y el resultado se ha decodificado. El audio generado es una mezcla inteligente de ambos. En la Imagen 6 se muestra la distancia de Fréchet para las mezclas de audios. El eje de abscisas contiene uno de los materiales usados en la mezcla, y el eje de ordenadas los sonidos sin mezcla originales.

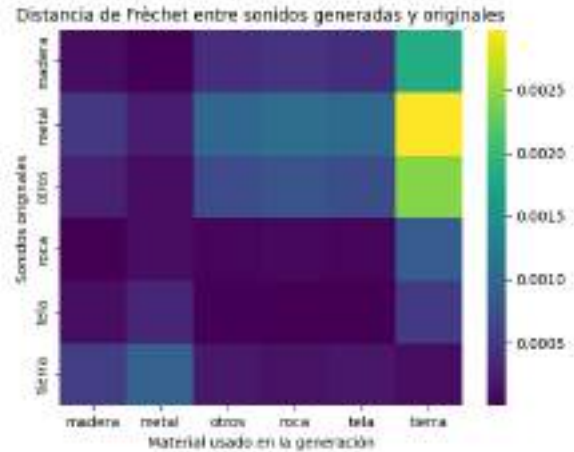


Imagen 5. Matriz de valores de FAD en función del tipo de material generado y comparado sobre el conjunto original

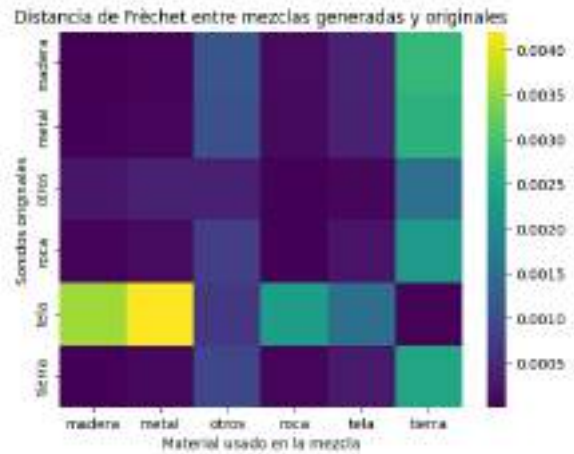


Imagen 6. Matriz de valores de FAD sobre audios mezcla en función del tipo de material.

Estas observaciones ofrecen una visión útil sobre cómo diferentes tipos de sonidos interactúan en las mezclas y cómo el modelo es capaz de mantener la coherencia con la base de datos original. En este caso, podemos señalar varios aspectos clave relacionados con los valores de la distancia de Fréchet (FAD) y las mezclas de sonidos:

1. Los valores bajos de FAD indican que las mezclas de sonidos resultan en efectos de pasos que son coherentes con la base de datos original. Esto sugiere una buena calidad en la generación de sonidos.
2. Se nota que ciertos tipos de sonidos son más dominantes que otros en las mezclas. Por ejemplo, cuando se mezcla cualquier sonido con "tela," los detalles tienden a desaparecer y el sonido de la tela queda subyugado por el otro sonido con el que se combina. En contraste, el sonido de "tierra" es muy dominante y tiende a sobresalir en cualquier mezcla en la que participa.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método sistemático para la generación de efectos sonoros mediante el uso de autocodificadores variacionales: Foley-VAE. Se ha analizado en detalle la investigación sobre RAVE y se ha desarrollado una aplicación para facilitar su uso. Los resultados se han utilizado en un contexto real para generar efectos sonoros en uno de los primeros cortometrajes realizados en España en beneficiarse de la inteligencia artificial para la creación de efectos de Foley. Además, se ha presentado y analizado un generador de pasos, que se ha tomado como referencia para analizar la capacidad generadora del sistema. Esta aplicación se ha puesto a disposición del público para su uso libre.

Los resultados presentados sobre los efectos sonoros de pasos han demostrado que Foley-VAE es un sistema que puede generar sonidos de gran calidad. Cuando se trata de regenerar los mismos audios contenidos en el subconjunto de test, la calidad perceptual equivalente es muy elevada. Cuando se trata de evaluar mezclas de sonidos, las nuevas creaciones son estadísticamente similares a los sonidos originales, demostrando capacidad generativa coherente. También resulta muy interesante analizar el espacio de embebimiento y el comportamiento de los distintos materiales.

Se ha comprobado que el esquema VAE entrenado ha adquirido conocimientos sobre la naturaleza de estos, hasta el punto de que las mezclas de materiales que físicamente no son posibles, son perceptualmente coherentes. También ha podido comprobarse la dominancia de unos materiales sobre otros, que intuitivamente cuadra con lo que cabría esperar (por ejemplo, el sonido acuoso de una pisada sobre barro dominando al de una tela). Recomendamos a los lectores que escuchen por sí mismos los resultados para valorar subjetivamente estas conclusiones.

Como línea de trabajo futura se contempla añadir una etapa adicional al proceso de inferencia del VAE que permita desentrelazar las variables latentes, tratando de garantizar la independencia entre sí, para así poder identificar unívocamente las características acústicas de cada variable. Esta mejora permitiría un uso más intuitivo de la aplicación, minimizando modificaciones arbitrarias de las variables hasta dar con un efecto deseado. Por otro lado, se contempla también utilizar modelos de difusión sobre el espacio latente que permitan mantener la coherencia temporal del sonido. Ello facilitaría la labor de introducción del efecto de audio en la producción artística. Por último, cabe analizar las ponderaciones de mezclas para entender la dominancia de unos efectos sobre otros y armonizarlas entre sí, todo ello trabajando sobre el espacio latente y en base a sus propiedades y estructura propias.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a A. Kampmann, como director del cortometraje “El Testigo”, por su confianza en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en su obra cinematográfica, así como a Pancho Aguirre, como técnico de sonido, quien ha sido uno de los primeros usuarios de nuestra herramienta.

Este trabajo ha sido financiado conjuntamente por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España dentro del proyecto PID2021-128469OB-I00, el Programa de Investigación e Innovación de la Unión Europea Horizon 2020 dentro del “Grant Agreement No. 101003750”, y el Programa propio de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.

7. REFERENCIAS

- [1] Caillon, A., & Esling, P. (2021). RAVE: A variational autoencoder for fast and high-quality neural audio synthesis. arXiv preprint arXiv:2111.05011.
- [2] Van Den Doel, K., Kry, P. G., & Pai, D. K. (2001, August). FoleyAutomatic: physically-based sound effects for interactive simulation and animation. In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 537-544).
- [3] Adrien, J. M. (1991). The missing link: Modal synthesis. In Representations of musical signals (pp. 269-298).
- [4] Kingma, D. P., & Welling, M. (2013). Auto-encoding variational bayes. arXiv preprint arXiv:1312.6114.
- [5] Conan, S., Thoret, E., Aramaki, M., Derrien, O., Gondre, C., Ystad, S., & Kronland-Martinet, R. (2014). An intuitive synthesizer of continuous-interaction sounds: Rubbing, scratching, and rolling. *Computer Music Journal*, 38(4), 24-37.
- [6] Aramaki, M., Gondre, C., Kronland-Martinet, R., Voinier, T., & Ystad, S. (2009, May). Thinking the sounds: an intuitive control of an impact sound synthesizer. In International Conference on Auditory Display (ICAD'09) (pp. 119-124).
- [7] Fontana, F., & Bresin, R. (2003, May). Physics-based sound synthesis and control: crushing, walking and running by crumpling sounds. In Proc. Colloquium on Musical Informatics (pp. 109-114).
- [8] Choi, K., Oh, S., Kang, M., & McFee, B. (2022). A proposal for Foley sound synthesis challenge. arXiv preprint arXiv:2207.10760.
- [9] Purwins, H., Li, B., Virtanen, T., Schlüter, J., Chang, S. Y., & Sainath, T. (2019). Deep learning for audio signal processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 13(2), 206-219.
- [10] Oord, A. V. D., Dieleman, S., Zen, H., Simonyan, K., Vinyals, O., Graves, A., ... & Kavukcuoglu, K. (2016).

- Wavenet: A generative model for raw audio. arXiv preprint arXiv:1609.03499.
- [11] Borsos, Z., Marinier, R., Vincent, D., Kharitonov, E., Pietquin, O., Sharifi, M., ... & Zeghidour, N. (2023). Audiolm: a language modeling approach to audio generation. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*.
- [12] Agostinelli, A., Denk, T. I., Borsos, Z., Engel, J., Verzetti, M., Caillon, A., ... & Frank, C. (2023). Musiclm: Generating music from text. arXiv preprint arXiv:2301.11325.
- [13] Pasini, M., & Schlüter, J. (2022). Musika! Fast infinite waveform music generation. arXiv preprint arXiv:2208.08706.
- [14] Ghose, S., & Prevost, J. J. (2020). Autofoley: Artificial synthesis of synchronized sound tracks for silent videos with deep learning. *IEEE Transactions on Multimedia*, 23, 1895-1907.
- [15] Engel, J., Resnick, C., Roberts, A., Dieleman, S., Norouzi, M., Eck, D., & Simonyan, K. (2017, July). Neural audio synthesis of musical notes with wavenet autoencoders. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 1068-1077). PMLR.
- [16] Cámara Largo, M. J., & Blanco Murillo, J. L. (2022). Acercando los autocodificadores variacionales al gran público. *Revista de acústica*, 53(3), 3-11.
- [17] Dhariwal, P., Jun, H., Payne, C., Kim, J. W., Radford, A., & Sutskever, I. (2020). Jukebox: A generative model for music. arXiv preprint arXiv:2005.00341.
- [18] Esqueda, F., Kuznetsov, B., & Parker, J. D. (2021, September). Differentiable white-box virtual analog modeling. In *2021 24th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx)* (pp. 41-48). IEEE.
- [19] Natsiou, A., & O'Leary, S. (2021, November). Audio representations for deep learning in sound synthesis: A review. In *2021 IEEE/ACS 18th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)* (pp. 1-8). IEEE.
- [20] Yuan, Y., Liu, H., Liu, X., Kang, X., Plumbley, M. D., & Wang, W. (2023). Latent Diffusion Model Based Foley Sound Generation System For DCASE Challenge 2023 Task 7. arXiv preprint arXiv:2305.15905.
- [21] Jin, X., Li, S., Qu, T., Manocha, D., & Wang, G. (2020, October). Deep-modal: real-time impact sound synthesis for arbitrary shapes. In *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia* (pp. 1171-1179).
- [25] Kang, M., Oh, S., Moon, H., Lee, K., & Chon, B. S. (2023). FALL-E: Gaudio foley synthesis system. Tech. Rep., June.
- [26] Lee, J., Nam, H., & Park, Y. H. (2023). VIFS: An End-to-End Variational Inference for Foley Sound Synthesis. arXiv preprint arXiv:2306.05004.
- [27] Hawthorne, C., Simon, I., Roberts, A., Zeghidour, N., Gardner, J., Manilow, E., & Engel, J. (2022). Multi-instrument music synthesis with spectrogram diffusion. arXiv preprint arXiv:2206.05408.
- [28] Kong, J., Kim, J., & Bae, J. (2020). Hifi-gan: Generative adversarial networks for efficient and high fidelity speech synthesis. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 17022-17033.
- [29] Cámara, M., & Blanco, J. L. (2022). Phase-Aware Transformations in Variational Autoencoders for Audio Effects. *Journal of the Audio Engineering Society*, 70(9), 731-741.
- [30] Engel, J., Hantrakul, L., Gu, C., & Roberts, A. (2020). DDSP: Differentiable digital signal processing. arXiv preprint arXiv:2001.04643.
- [31] Steinmetz, C. J., Bryan, N. J., & Reiss, J. D. (2022). Style transfer of audio effects with differentiable signal processing. arXiv preprint arXiv:2207.08759.
- [32] Vanhatalo, T., Legrand, P., Desainte-Catherine, M., Hanna, P., Brusco, A., Pille, G., & Bayle, Y. (2022, October). Neural Network-Based Virtual Analog Modeling. In *International Conference on Artificial Evolution (Evolution Artificielle)* (pp. 58-72). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [33] Yu, C., Lu, H., Hu, N., Yu, M., Weng, C., Xu, K., ... & DurIAN, D. Y. (2019). Duration informed attention network for multimodal synthesis. arXiv preprint arXiv:1909.01700.
- [34] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. (2020). Generative adversarial networks. *Communications of the ACM*, 63(11), 139-144.
- [35] Hines, A., Skoglund, J., Kokaram, A. C., & Harte, N. (2015). ViSQOL: an objective speech quality model. *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, 2015(1), 1-18.
- [36] Kilgour, K., Zuluaga, M., Roblek, D., & Sharifi, M. (2018). Fréchet Audio Distance: A Metric for Evaluating Music Enhancement Algorithms. arXiv preprint arXiv:1812.08466.
- [37] Kumar, K., Kumar, R., De Boissiere, T., Gestin, L., Teoh, W. Z., Sotelo, J., ... & Courville, A. C. (2019). Melgan: Generative adversarial networks for conditional waveform synthesis. *Advances in neural information processing systems*, 32.

IMPACTO DEL PREPROCESAMIENTO EN LA CLASIFICACIÓN DE LA ELEVACIÓN DE SEÑALES HRTF EN MÚLTIPLES CONJUNTOS DE DATOS

Juan A. De Rus^{1*} Jesus Lopez-Ballester¹ Mario Montagud^{1,2}

Francesc J. Ferri¹ Jose J. Lopez³ Maximo Cobos¹

¹ Computer Science Department, Universitat de Valencia, Spain

² i2CAT Foundation, Barcelona, Spain

³ iTEAM, Universitat Politècnica de València, Spain

RESUMEN

La localización de fuentes de sonido en el plano horizontal se basa en diferencias en el nivel y tiempo interaurales. Sin embargo, identificar la elevación dadas las Funciones de Transferencia Relacionadas con la Cabeza (HRTF) sigue siendo un desafío. Los patrones espectrales desempeñan un papel importante en la localización en la dimensión vertical y son altamente individuales debido a las características anatómicas de cada persona. En un estudio previo, se propuso una red neuronal convolucional simple para clasificar las señales HRTF en sectores de elevación y detectar las señales espectrales relacionadas con la elevación. Aunque el modelo obtuvo buenos resultados, solo se entrenó y validó en la base de datos CIPIC. En este trabajo, nos enfocamos en desarrollar un modelo que pueda generalizarse a múltiples conjuntos de datos de HRTF, logrando un buen rendimiento de clasificación en diferentes sujetos y medidas. Dado que cada conjunto de datos se obtiene en condiciones diferentes, el preprocesamiento de los datos puede tener un impacto significativo en el rendimiento del modelo. Se exploran diferentes técnicas de preprocesamiento y se evalúa su impacto en la clasificación, con el fin de seleccionar estrategias de estandarización adecuadas para trabajar con múltiples conjuntos de datos de HRTF.

ABSTRACT

The process of locating sound sources on the horizontal plane primarily relies on perceived differences in both interaural level and time. However, recognizing elevation signals within Head-Related Transfer Functions (HRTFs) remains a complex task. Spectral signals play a crucial role in identifying the vertical position of sound sources and are highly personalized, influenced by the unique anatomical features of individuals, including the shape of their ears, head, and torso. A prior study introduced a straightforward 1D convolutional neural network (CNN) designed to categorize

HRTF signals into distinct elevation categories, thereby identifying spectral elevation signals using interpretability techniques. Despite achieving promising results, this model was exclusively trained and validated using the CIPIC database. This research project centers on the creation of a model capable of generalizing across multiple HRTF datasets, ensuring strong classification performance across various individuals and measurement conditions. Given that each dataset is collected under differing conditions (such as the source signal used, distance between transmitters and receivers, spatial resolution, and calibration), the preprocessing of data could substantially influence the overall performance of inter-dataset models. This study explores different preprocessing techniques and assesses their impact on the classification task to select meaningful standardization strategies.

Palabras Clave— HRTF, señales de elevación, preprocesamiento de conjuntos de datos, redes neuronales convolucionales.

1. INTRODUCCIÓN

Las HRTF describen la transmisión del sonido desde un punto en el espacio hasta el canal auditivo humano [1]. Este concepto encuentra aplicación en diversos campos, como el diseño de sonido personalizado para individuos, incluyendo la cancelación de ruido [2] y la creación de entornos de Realidad Virtual (RV) inmersivos [3]. La HRTF de cada persona es única, influenciada por factores como la forma de la cabeza, el torso, los hombros y las orejas, entre otras características [4].

El objetivo principal de nuestro estudio es desarrollar un modelo de clasificación basado en Redes Neuronales Convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) que utilice eficazmente datos de múltiples conjuntos de datos de HRTF para identificar la ubicación en elevación en el plano medio.

* *Autor de contacto:* juan.rus@uv.es

Copyright: ©2023 Juan A. De Rus et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Pretendemos explorar qué señales de localización son cruciales para determinar la elevación de una respuesta de HRTF dada, y planteamos la hipótesis de que la capacidad del modelo para clasificar el sector de elevación captará inherentemente estas características, permitiendo la generalización en todos los conjuntos de datos. Para lograr esto, empleamos técnicas de estandarización de datos y comparamos el rendimiento del modelo en los diferentes conjuntos de datos, resaltando el impacto de las diferencias entre los conjuntos de datos en los resultados.

1.1. Desafíos en la localización de fuentes de sonido en elevación

Para localizar una fuente de sonido en el plano horizontal, se pueden emplear diversas señales de localización, como la diferencia de tiempo interaural (ITD), la diferencia de nivel interaural (ILD), señales espectrales (SC) y directividad del plano horizontal (HPD). Sin embargo, estas señales no son igualmente efectivas para la localización en elevación. En el plano vertical, estamos limitados a utilizar señales espectrales producidas por factores antropométricos, incluyendo reflexiones y refracciones desde la oreja y el torso [5]. Por lo tanto, mientras que ITD y ILD suelen ser suficientes para determinar la localización horizontal de una fuente de sonido, las señales espectrales desempeñan un papel crucial en la determinación de la ubicación en elevación.

Investigaciones previas han demostrado que las distorsiones de la oreja (pinna) se manifiestan como señales espectrales para la localización en elevación más allá de la banda de frecuencia de 4 kHz [6], extendiéndose hasta 10 kHz [7].

inferior (Back Down), así como laterales, como se muestra en la Tabla 1, utilizando datos del conjunto de datos CIPIC [11]. Utilizamos coordenadas esféricas con la convención "side", que utiliza un ángulo lateral que varía en el plano horizontal desde [-90, 90] y un ángulo polar que varía en el plano medio desde [-90, 270]. Elegimos las CNN debido a sus capacidades de reconocimiento de patrones [12], que se han utilizado con éxito para capturar características de audio espacial en HRTFs [13], así como en otras tareas orientadas al sonido, como la clasificación de escenas acústicas [14], etiquetado de música [15], reconocimiento de voz [16] o discriminación automática entre ubicaciones frontales y traseras en grabaciones binaurales [17].

Tabla 1 - Rangos Angulares de cada sector de elevación

Clase	Ángulo Polar	Ángulo Lateral
Front Down	[-90, -20]	[-60, 60]
Front Level	(-20, 20]	[-60, 60]
Front Up	(20, 70]	[-60, 60]
Up	(70, 110]	[-60, 60]
Back Up	(110, 160]	[-60, 60]
Back Level	(160, 200]	[-60, 60]
Back Down	(200, 270]	[-60, 60]
Lateral Up	[0, ∞)	lateral > 60
Lateral Down	(-∞, 0)	lateral > 60

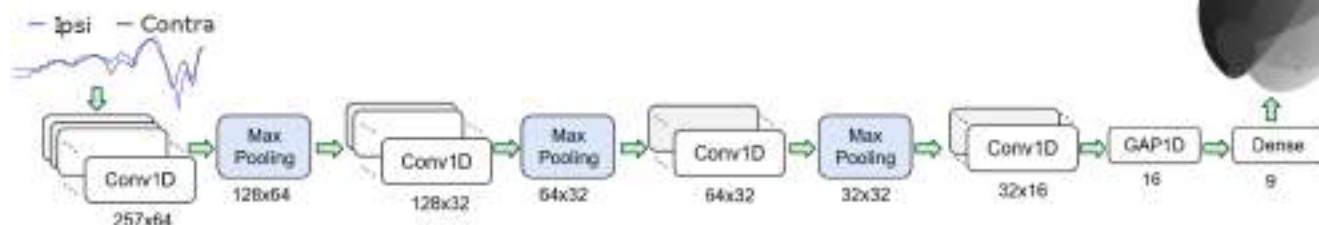


Figura 1 - Topología de la arquitectura de convolución desarrollada en el estudio anterior para clasificar las HRTF en nueve sectores de elevación

Además, a 12 kHz, una señal espectral aparece como un pico, indicando que el sonido proviene desde atrás del oyente [8]. Otro efecto a tener en cuenta es que la muesca significativa se desplaza hacia bandas de frecuencia más bajas a medida que el sonido se mueve desde el cenit hacia la mitad frontal inferior del plano medio [9].

1.2. Trabajo previo

En un estudio anterior [10], entrenamos una CNN para clasificar HRTFs en diversos sectores de elevación que iban desde la zona frontal inferior (Front Down) hasta la posterior

Nuestro modelo completamente convolucional consistió en tres bloques convolucionales 1D con activación ReLU y max-pooling entre bloques, seguidos de una última capa convolucional y una capa de pooling promedio global para resumir las respuestas de los filtros antes de la última capa densa con activación softmax (Figura 1). Este modelo simple logró una precisión significativa. Se pueden encontrar más detalles sobre el modelo y su entrenamiento en [10].

Luego, exploramos el uso de técnicas comunes de inteligencia artificial explicables (XAI) [18] para determinar

en qué se fijaba el modelo para hacer sus predicciones, incluyendo qué partes de los datos eran más importantes o relevantes para la predicción. Comparamos los resultados con los de la literatura. Las dos técnicas de XAI que empleamos fueron el Mapeo de Activación de Clase (CAM) [19] y CAM de gradiente (GradCam) [20].

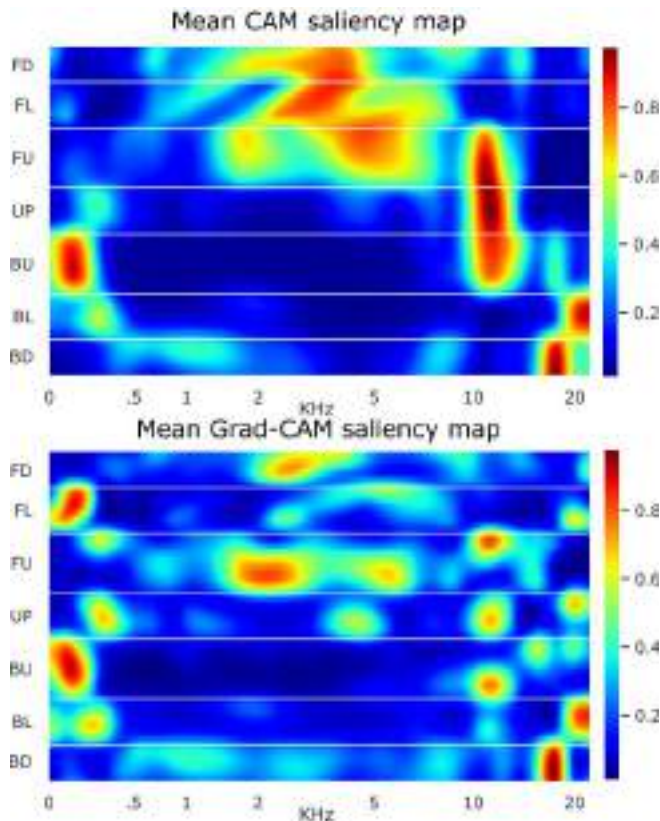


Figura 2 - Mapas de Saliencia CAM (arriba) y Grad-CAM (abajo) promediados entre sujetos y azimut, mostrados por clase de elevación.

1.2.1 Hallazgos

Identificamos bandas de frecuencia significativas que presentaban una mayor prominencia al ser clasificadas en correspondencia con diferentes sectores de elevación en los datos. También encontramos una prominencia alta (lo que podría indicar posibles señales de elevación) en la banda de frecuencia baja por debajo de 500 Hz para las regiones traseras desde "Back-Down" hasta "Up" (hacia arriba), que no se encuentra en las regiones frontales (Figura 2).

Además, encontramos un posible efecto de complementariedad entre regiones opuestas, como "Front Level" y "Back Level", con prominencias opuestas en la banda de frecuencia de 2 a 10 kHz, que son casi idénticas fuera de este rango (Figura 3).

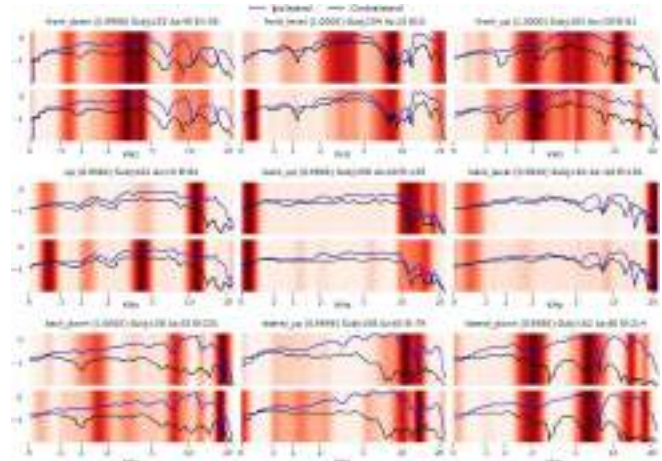


Figura 3 - Mapas de saliencia CAM (arriba) y Grad-CAM (abajo) sobre la muestra más representativa de cada clase. La probabilidad de clase predicha se indica entre paréntesis. La leyenda de colores va desde rojo, indicando alta relevancia, hasta tonos blancos, indicando baja saliencia.

2. PRECISIÓN DEL MODELO ENTRE CONJUNTOS DE DATOS

Como se explicó anteriormente, el enfoque de este trabajo se centra en el desarrollo de modelos para la clasificación de la elevación de HRTFs, con un énfasis particular en los resultados entre conjuntos de datos. En otras palabras, estamos interesados en examinar qué tan bien un modelo funciona cuando se entrena en un conjunto de datos de HRTF pero se prueba en datos de un conjunto de datos diferente.

2.1 Formato de datos utilizado

Para abordar el desafío de trabajar con diferentes conjuntos de datos, cada uno con sus características y particularidades únicas, se han realizado diversos esfuerzos para estandarizar los formatos de datos, como el formato Marl-Nyu para Matlab [21]. En nuestro caso, para facilitar el trabajo con diferentes conjuntos de datos, optamos por utilizar el Formato Espacialmente Orientado para Acústica (SOFA, por sus siglas en inglés) [22]. El Formato SOFA se caracteriza por incluir información autocontenida sobre la descripción de la configuración de medición y todos los elementos relevantes, como el oyente, la fuente y la sala, en cada archivo.

Además, el formato SOFA permite utilizar los datos como HRTFs en el dominio de la frecuencia o como Respuestas de Impulso Relativas a la Cabeza (HRIRs) en el dominio del tiempo. En este trabajo, utilizamos HRIRs y aplicamos nuestro propio preprocesamiento. Todos los datos utilizados en este trabajo se han adquirido en formato .SOFA y están disponibles en la siguiente dirección web: <https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/Files>

2.2 Conjuntos de datos utilizados, características y diferencias

En este trabajo, utilizamos datos de 11 conjuntos de datos de HRTF distintos: RIEC [23], FABIAN [24], CIPIC [11], HUTUBS [25], AACHEN [26], LISTEN [27], ARI [28], Crossmod [29], SADIE [30], BiLi [31] y 3D3A [32]. Con el fin de resaltar las principales diferencias entre estos conjuntos de datos que podrían afectar negativamente la compatibilidad de los modelos entrenados con datos diferentes, extrajimos información de diversas fuentes, incluyendo los sitios web de los conjuntos de datos, los documentos asociados y los archivos SOFA.

2.2.1 Condiciones de grabación: cámaras, señales de origen, distancias

Como podemos ver en la Tabla 2, no existe un estándar para la distancia promedio entre las orejas y la distancia a la fuente, lo que puede afectar los niveles de amplitud de las HRTFs resultantes. Además, en los conjuntos de datos que hemos observado, las técnicas derivadas de Swept Sines se utilizan predominantemente para la señal de origen, aunque también se han empleado otros métodos, como ruido pseudo-aleatorio y el Pulso Estirado en el Tiempo Optimizado de Aoshima (OATSP) [33].

Sin embargo, la calidad de las HRTFs resultantes puede verse afectada por las cámaras utilizadas para las grabaciones, que no siempre son anecoicas. Esto puede introducir reflexiones no deseadas y distorsiones que afectan la precisión y confiabilidad de cualquier análisis o modelado subsiguiente basado en estas HRTFs.

Tabla 2 - Diferencias en la configuración de grabación: distancias entre oídos y fuente (en metros), señal de origen y uso de cámara anecoica

Data	Oreja	Fuente	Señal ¹	Anec.
RIEC	0.09	1.5	OATSP	Si
Fabian	0.0662	1.7	Swept S.	Si
CIPIC	0.09	1.5	R. Noise	No ²
Hutubs	0.75	1.47	M.E.S.S.	Si
AACHEN	0.07	1.2	Swept S.	Semi
Listen	0.09	2.06	Exp. S.S.	Si
ARI	0.09	1.2	Exp. S.S.	Semi
Crossmod	0.09	2.06	Exp. S.S.	Si
SADIE	0.09	1.2	O. Swept S.	Si
BiLi	0.09	2.06	Exp. S.S.	Si
3D3A	0.085	0.76	M.E.S.S.	Si

¹OATSP: Optimized Aoshima's Time-Stretched Pulse
²Swept S.: Swept Sine
 R. Noise: Pseudo-Aleatory Noise
 M.E.S.S.: Multiple Exponential Sine Sweep
 :Room with absorber

2.2.2 Datos de muestra: duración, tasa de muestreo y número de sujetos

Las variaciones en la tasa de muestreo (SR) y el número total de muestras para cada HRTF son factores significativos a considerar al combinar datos de diferentes conjuntos de datos para el entrenamiento del modelo. Durante el preprocesamiento, es importante tener en cuenta los factores mencionados anteriormente, asegurando que las representaciones de datos finales utilizadas para el entrenamiento del modelo sean coherentes en todos los conjuntos de datos.

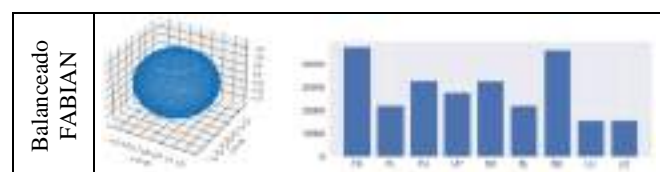
Tabla 3 - Diferencias entre las muestras de distintos conjuntos de Datos: Muestras por HRTF, Frecuencia de muestreo, y número de sujetos.

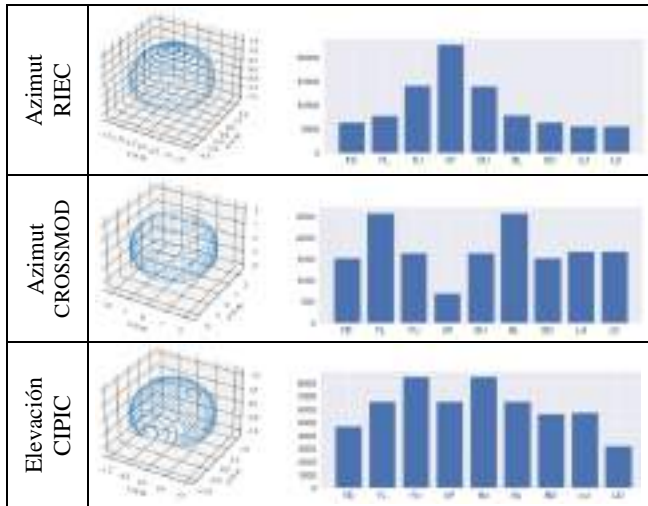
Conjunto Datos	Muestras	SR (kHz)	Nº Suj.
RIEC	512	48	105
Fabian	256	44.1	22
CIPIC	200	44.1	45
Hutubs	256	44.1	96
AACHEN	256	44.1	48
Listen	8192	44.1	50
ARI	256	48	200
Crossmod	8192	44.1	24
SADIE	256	48	20
BiLi	512	96	56
3D3A	2048	96	38

2.2.3 Distribución espacial y de clases

La distribución espacial de las mediciones en términos de los ángulos tomados puede variar significativamente entre conjuntos de datos. Pueden surgir diferencias en la densidad de muestras, el rango de ángulos en elevación y la uniformidad de la distribución de muestras. En algunos conjuntos de datos, existen desequilibrios con una mayor densidad de muestras a lo largo de los ángulos de elevación o de azimut. Además, puede haber diferencias en la distribución de clases de los conjuntos de datos, lo que podría afectar el rendimiento de los modelos de HRTF entrenados con ellos (ver Tabla 4).

Tabla 4 - Coordenadas Espaciales y Balanceo de Clases





2.2.4 Muestras postprocesadas

Además, algunos conjuntos de datos han sido sometidos a un procesamiento posterior antes de su publicación, como se resume en la Tabla 5. Este procesamiento posterior incluye ecualización, cortes de frecuencia, simulaciones numéricas, ventana temporal, calibración de ganancia, compensación de baja frecuencia, extensión de baja frecuencia y ecualización de campo difuso. Combinar datos en bruto y datos procesados puede tener algunos efectos.

Tabla 5 - Resumen del Procesamiento de los Conjuntos de Datos en Archivos SOFA: Datos en Crudo, Ecualización, Corte de Frecuencias, Ventana Temporal, Compensación de Bajas Frecuencias, Calibración de Ganancia, Ecualización de Campo Difuso, Simulación Numérica

Dataset	Raw	Eq	FCO	TW	LFC	GC	DF Eq	NS
RIEC				✓	✓	✓		
Fabian								✓
CIPIC	✓							
Hutubs			✓					
AACHEN			✓					
Listen	✓							
ARI			✓					
Crossmod	✓							
SADIE				✓	✓	✓	✓	
BiLi		✓		✓				
3D3A		✓						

3. TÉCNICAS DE PREPROCESAMIENTO PROBADAS

Nuestro objetivo fue estandarizar datos de diferentes conjuntos de datos grabados en condiciones variables para mejorar el rendimiento de los modelos entrenados con un tipo de datos en la predicción de la ubicación de HRTFs de diferentes conjuntos de datos. Para llevar a cabo esta tarea, experimentamos con diversas técnicas de preprocesamiento aplicadas a las HRTFs en el dominio de la frecuencia y las utilizamos para entrenar diferentes modelos.

3.1 Normalización

Probamos tres técnicas de normalización: sin normalización, normalización min-max y normalización de Energía Promedio en el Ecuador [34]. En la normalización min-max, cada muestra de HRTF tiene un pico en 1 y una muesca en -1. En la normalización de Energía Promedio en el Ecuador, dividimos cada muestra de HRTF por la energía promedio de HRTF en el ecuador (ángulo de elevación cero).

3.2 Mel warping

Aunque esta técnica no se utilizó para estandarizar los datos, la empleamos para evaluar la respuesta del modelo convirtiendo las HRTFs a la Escala Mel, que es una escala de frecuencia más alineada con la percepción humana. Para lograr esto, dividimos el rango de frecuencias en puntos equidistantes en la Escala Mel y seleccionamos los bins de frecuencia que estaban más cerca de sus respectivas frecuencias en Hz.

3.3 Corte de frecuencia

Realizamos pruebas con diferentes rangos efectivos de frecuencias, incluyendo el rango completo [0-22050 Hz] así como varios rangos restringidos como [20-22050 Hz], [20-16000 Hz], [20-22000 Hz], [50-22050 Hz], [50-16000 Hz], [50-22000 Hz], [500-22050 Hz], [500-16000 Hz] y [500-22000 Hz]. Estas pruebas se realizaron con la comprensión de que algunos conjuntos de datos tienen un rango funcional restringido de frecuencias y algunos pueden tener frecuencias más bajas simuladas o procesadas. Además, dado que en nuestro estudio anterior encontramos señales útiles de elevación por debajo de 5 kHz, queríamos evaluar los resultados cuando las frecuencias por debajo son suprimidas.

3.4 Escala de amplitud

Experimentamos con dos escalas diferentes de HRTF, lineal y logarítmica (log10). La escala lineal mantiene una relación de amplitud constante entre las señales de entrada y salida, mientras que la escala logarítmica (log10) comprime la amplitud de las señales de entrada para producir una salida más uniforme desde el punto de vista perceptual.

4. EXPERIMENTOS

Realizamos extensos experimentos en cada conjunto de datos, utilizando los diversos métodos y parámetros descritos anteriormente. Entrenamos modelos individuales para cada conjunto de datos, así como un modelo combinado con un pequeño porcentaje de muestras de cada conjunto de datos (el 10% de los datos de entrenamiento de los otros conjuntos de datos) y algunos modelos combinados con datos de solo algunos conjuntos de datos seleccionados (el porcentaje variaba según el número de conjuntos de datos seleccionados). Luego, probamos cada modelo con sus propios datos de prueba, así como con datos de prueba de diferentes conjuntos de datos. Nos aseguramos de utilizar sujetos diferentes para el entrenamiento y la prueba, y de mantener la consistencia en el preprocesamiento de datos; por ejemplo, si un modelo se entrenó con datos utilizando una transformación de Mel Warping, probamos ese modelo con diferentes conjuntos de datos con el mismo preprocesamiento. Sin embargo, debido a limitaciones de tiempo y la necesidad de entrenar un gran número de modelos para cada experimento, limitamos el entrenamiento de cada modelo a 100 épocas, con una paciencia de 20 (es decir, se detuvo el entrenamiento si no hubo mejora en el rendimiento durante 20 épocas).

4.1 Resultados sobre la influencia del preprocesamiento

Aunque algunos métodos mostraron mejores resultados de precisión para conjuntos de datos y condiciones específicas, en general, no encontramos ningún parámetro que fuera estadísticamente significativo en comparación con los demás en todos los casos (ver Tabla 6). Realizamos experimentos cambiando solo una variable a la vez mientras manteníamos el resto fijo, y después de analizar los resultados, seleccionamos las pruebas finales con los siguientes parámetros: Normalización de Energía Promedio en el Ecuador, Rango completo de frecuencias (sin corte), sin Mel Warping y escala de amplitud lineal. Estos parámetros se eligieron porque produjeron resultados ligeramente mejores.

Tabla 6 – P-Values para distintos parámetros de: Conjunto de datos usado, Amplitud, Normalización, Mel Warp y Corte de Frecuencias

Data	Ampl	Norm	Mel W.	Freq Cut
2.12e-9	.64	.9	.35	.0503

4.2 Resultados entre conjuntos de datos

Como era de esperar, cada modelo obtuvo buenos resultados cuando se probó con el conjunto de datos al que pertenecen sus muestras de entrenamiento. Sin embargo, obtuvimos resultados de precisión deficientes en conjuntos de datos distintos al utilizado para el entrenamiento. El modelo entrenado con una combinación de distintos conjuntos de datos obtuvo el mejor resultado (Figura 4), a pesar de haber sido entrenado con un número reducido de muestras de cada

uno. Es importante señalar que el número limitado de épocas de entrenamiento puede haber afectado los resultados.



Figura 4 - Resultados de precisión alcanzada por modelos entrenados con un conjunto de datos (filas) contra otros conjuntos de datos distintos (columnas).

5. DISCUSIÓN

Observamos un fenómeno interesante en el que ciertos conjuntos o grupos de conjuntos de datos demostraron una mayor precisión dentro de sí mismos que contra otros conjuntos de datos. Identificamos dos grupos distintos: uno compuesto por los conjuntos de datos Crossmod, BiLi y Listen, y otro que consiste en CIPIC, Riec, Hutubs y AACHEN.

Los conjuntos de datos en el primer grupo, Crossmod, BiLi y Listen, comparten varias similitudes, como la misma distancia entre las orejas (0.09), la misma distancia a la fuente (2.06), el uso de una cámara anecoica y la misma señal de origen (Sine Sweep Exponencial). Por otro lado, los conjuntos de datos en el segundo grupo, CIPIC, Riec, Hutubs y AACHEN, no parecen compartir ninguna característica discernible que explique los resultados de precisión entre conjuntos de datos observados.

6. TRABAJO FUTURO

Nuestro trabajo futuro implica la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial Explicable (XAI) para analizar los resultados obtenidos al trabajar con diversos conjuntos de datos. Nuestro objetivo es identificar los factores responsables del bajo rendimiento de los modelos de clasificación entrenados con datos diferentes y determinar los factores más significativos que contribuyen a este comportamiento. Investigaremos diferentes condiciones que pueden afectar las grabaciones de HRTF, como la distancia entre las orejas, la distancia al emisor, la señal de origen utilizada y las técnicas de procesamiento de datos. Además, analizaremos cómo estas condiciones afectan la prominencia de las bandas de frecuencia de HRTF y su importancia para el modelo de clasificación. Una vez identificadas las causas,

nuestro objetivo es proponer técnicas de estandarización adecuadas para trabajar con conjuntos de datos heterogéneos de HRTF en problemas relacionados, como la personalización de HRTF.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por las Becas FPU20/05384 y RYC2020-030679-I del MCIN/AEI/10.13039/501100011033, así como por el "Fondo Social Europeo (FSE) Invertir en tu Futuro". Subvención TED2021-131003B-C21 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el "Fondo de la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR". Los autores también agradecen los recursos informáticos Artemisa financiados por el FEDER y la Comunitat Valenciana, y el apoyo técnico del IFIC (CSIC-UV).

8. REFERENCIAS

- [1] H. Møller, M. F. Sørensen, D. Hammershøi, and C. B. Jensen, "Head-related transfer functions of human subjects," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 43, no. 5, pp. 300–321, 1995.
- [2] H. Nakashima, R. Kouyama, N. Hiruma, and Y.-i. Fujisaka, "Binaural wind noise detection, cancellation and its evaluation for hearing aids based on HRTF cues," pp. 004896–004899, 2015.
- [3] M. Geronazzo, E. Sikström, J. Kleimola, F. Avanzini, A. De Goetzen, and S. Serafin, "The impact of an accurate vertical localization with HRTFs on short explorations of immersive virtual reality scenarios," in *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 90–97, IEEE, 2018.
- [4] M. Zhu, M. Shahnawaz, S. Tubaro, and A. Sarti, "HRTF personalization based on weighted sparse representation of anthropometric features," in *2017 International Conference on 3D Immersion (IC3D)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [5] G.-T. Lee, S.-M. Choi, B.-Y. Ko, and Y.-H. Park, "HRTF measurement for accurate identification of binaural sound localization cues," *arXiv preprint arXiv:2203.03166*, 2022.
- [6] K. Iida and Y. Ishii, "Individualization of the head-related transfer functions on the basis of the spectral cues for sound localization," in *Principles and applications of spatial hearing*, pp. 159–178, World Scientific, 2011.
- [7] A. Alves-Pinto, A. R. Palmer, and E. A. Lopez-Poveda, "Perception and coding of high-frequency spectral notches: potential implications for sound localization," *Frontiers in neuroscience*, vol. 8, p. 112, 2014.
- [8] J. Hebrank and D. Wright, "Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, no. 6, pp. 1829–1834, 1974.
- [9] R. A. Butler and K. Belendiuk, "Spectral cues utilized in the localization of sound in the median sagittal plane," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, no. 5, pp. 1264–1269, 1977.
- [10] J. A. De Rus, A. Lopez-García, J. Lopez-Ballester, J. J. Lopez, A. M. Torres, F. J. Ferri, M. Montagud, and M. Cobos, "On the Application of Explainable Artificial Intelligence Techniques on HRTF Data," in *24th International Congress on Acoustics Proceedings*, (Gyeongju, Korea), Oct. 2022.
- [11] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson, and C. Avendano, "The CIPIC HRTF database," in *Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (Cat. No. 01TH8575)*, pp. 99–102, IEEE, 2001.
- [12] K. O'Shea and R. Nash, "An introduction to convolutional neural networks," *arXiv preprint arXiv:1511.08458*, 2015.
- [13] E. Thuillier, H. Gamper, and I. J. Tashev, "Spatial audio feature discovery with convolutional neural networks," in *2018 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, pp. 6797–6801, IEEE, 2018.
- [14] J. Abeßer, "A review of deep learning based methods for acoustic scene classification," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, p. 2020, 2020.
- [15] T. Kim, J. Lee, and J. Nam, "Sample-level cnn architectures for music auto-tagging using raw waveforms," in *2018 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, pp. 366–370, IEEE, 2018.
- [16] S. Kwon, "A cnn-assisted enhanced audio signal processing for speech emotion recognition," *Sensors*, vol.

- 20, no. 1, p. 183, 2019.
- [17] S. K. Zielin'ski, P. Antoniuk, H. Lee, and D. Johnson, "Automatic discrimination between front and back ensemble locations in hrtf-convolved binaural recordings of music," *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, vol. 2022, no. 1, p. 3, 2022.
- [18] A. B. Arrieta, N. D'iaz-Rodr'iguez, J. Del Ser, A. Benetot, S. Tabik, A. Barbado, S. Garc'ia, S. Gil-Lo'pez, D. Molina, R. Benjamins, *et al.*, "Explainable artificial intelligence (xai): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible ai," *Information fusion*, vol. 58, pp. 82–115, 2020.
- [19] B. Zhou, A. Khosla, A. Lapedriza, A. Oliva, and A. Torralba, "Learning deep features for discriminative localization," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2921–2929, 2016.
- [20] R. R. Selvaraju, M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh, and D. Batra, "Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization," in *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pp. 618–626, 2017.
- [21] A. Andreopoulou and A. Roginska, "Towards the creation of a standardized HRTF repository," in *Audio Engineering Society Convention 131*, Audio Engineering Society, 2011.
- [22] P. Majdak, Y. Iwaya, T. Carpentier, R. Nicol, M. Parmentier, A. Roginska, Y. Suzuki, K. Watanabe, H. Wierstorf, H. Ziegelwanger, *et al.*, "Spatially oriented format for acoustics: A data exchange format representing head-related transfer functions," in *Audio Engineering Society Convention 134*, Audio Engineering Society, 2013.
- [23] K. Watanabe, Y. Iwaya, Y. Suzuki, S. Takane, and S. Sato, "Dataset of head-related transfer functions measured with a circular loudspeaker array," *Acoustical science and technology*, vol. 35, no. 3, pp. 159–165, 2014.
- [24] F. Brinkmann, A. Lindau, S. Weinzierl, M. Mu'ller-Trapet, R. Opdam, M. Vorla'nder, *et al.*, "A high resolution and full-spherical head-related transfer function database for different head-above-torso orientations," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 65, no. 10, pp. 841–848, 2017.
- [25] F. Brinkmann, M. Dinakaran, R. Pelzer, P. Grosche, D. Voss, and S. Weinzierl, "A cross-evaluated database of measured and simulated hrtfs including 3d head meshes, anthropometric features, and headphone impulse responses," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 67, no. 9, pp. 705–718, 2019.
- [26] R. Bomhardt, M. de la Fuente Klein, and J. Fels, "A high-resolution head-related transfer function and three-dimensional ear model database," in *Proceedings of Meetings on Acoustics 172ASA*, vol. 29, p. 050002, Acoustical Society of America, 2016.
- [27] O. Warusfel, "Listen hrtf database." <http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/>, 2023.
- [28] I. fu'r Schallforschung, "Hrtf-database." <https://www.oeaw.ac.at/en/isf/das-institut/software/hrtf-database>.
- [29] "Crossmod hrtfs." [https://sofacoustics.org/data/database/crossmod\(hrtf\)/](https://sofacoustics.org/data/database/crossmod(hrtf)/).
- [30] C. Armstrong, L. Thresh, D. Murphy, and G. Kearney, "A perceptual evaluation of individual and non-individual hrtfs: A case study of the sadie ii database," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 11, p. 2029, 2018.
- [31] F. Rugeles Ospina, M. Emerit, and B. F. Katz, "The three-dimensional morphological database for spatial hearing research of the bili project," in *Proceedings of Meetings on Acoustics 169ASA*, vol. 23, p. 050001, Acoustical Society of America, 2015.
- [32] R. Sridhar, J. G. Tylka, and E. Choueiri, "A database of head-related transfer functions and morphological measurements," in *Audio Engineering Society Convention 143*, Audio Engineering Society, 2017.
- [33] Y. Suzuki, F. Asano, H.-Y. Kim, and T. Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, no. 2, pp. 1119–1123, 1995.
- [34] Y. Zhang, Y. Wang, and Z. Duan, "HRTF Field: Unifying Measured HRTF Magnitude Representation with Neural Fields," *arXiv preprint arXiv:2210.15196*, 2022.

OTIMIZAÇÃO DE HÍPER-PARÂMETROS EM CLASSIFICADORES DE SOM

André Silva Mendes¹

Paulo M. Trigo¹

Joel Preto Paulo¹

¹ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007
Lisboa; Portugal

RESUMO

O contributo deste trabalho é o de explorar o espaço de HyP (híper-parâmetros) na procura dos valores que otimizem o desempenho de todo o processo de classificação automática de sons impulsivos. Esse processo inicia na geração do conjunto de dados ("dataset") a processar, prossegue com a aprendizagem de modelos de classificação e termina com a avaliação dos modelos aprendidos.

O conceito de HyP refere-se, em geral, aos valores escolhidos para configuração de determinado algoritmo a executar num processo de Aprendizagem Automática. Esse algoritmo tem como "input" um "dataset" (os excertos de áudio) que o algoritmo processa visando aprender (descobrir) padrões contidos nesses dados. Neste trabalho propomos estender o conceito de HyP de modo a englobar também a construção do próprio "dataset". Temos 2 conjuntos de HyP: a) os usados para geração do "dataset" (HyP_data), e b) os usados pelo algoritmo que processa o "dataset" (HyP_learn). De modo mais formal, temos $\text{HyP} = \{\text{HyP_data}, \text{HyP_learn}\}$, e $\text{HyP_data} = \{\text{HyP_data_global}$ (e.g.: Event-Length, Number-of-Segments, Bandwidth), HyP_data_feature (e.g.: Root-Mean-Square, Band-Energy-Ratio, Spectral-Centroid, Zero-Crossing-Rate)}.

A validação do processo irá recorrer a áudio extraído de vídeos de competições de eventos desportivos, nomeadamente, ténis e padel onde se procuram identificar os sons de pancadas da raquete na bola.

ABSTRACT

The contribution of this work is to explore the HyP (hyperparameter) space in search of values that optimize the performance of the entire process of automatic classification of impulsive sounds. This process begins with the generation of the dataset to be processed, continues with the training of classification models, and ends with the evaluation of the learned models.

The concept of HyP generally refers to the values chosen for configuring a specific algorithm to be executed in a Machine Learning or Deep Learning process. This algorithm takes as its input a dataset (audio excerpts), which the algorithm processes in order to learn (discover) patterns

contained within that data. In this work, we propose to extend the concept of HyP to also encompass the construction of the dataset itself. As such, we have two sets of HyP: a) those used for generating the dataset (HyP_data), and b) those used by the algorithm that processes the dataset (HyP_learn). In a more formal manner, we have $\text{HyP} = \{\text{HyP_data}, \text{HyP_learn}\}$, and $\text{HyP_data} = \{\text{HyP_data_global}$ (e.g., Event-Length, Number-of-Segments, Bandwidth), HyP_data_feature (e.g., Root-Mean-Square, Band-Energy-Ratio, Spectral-Centroid, Zero-Crossing-Rate)}.

The validation of the process will involve audio extracted from videos of sports events, specifically tennis and paddle tennis, where the goal is to identify the sounds of racket hits on the ball.

Keywords — Machine Learning, Deep Learning, Audio Analysis, Sound Event Dataset, Hyperparameter Optimization.

1. INTRODUÇÃO

Em determinada modalidade desportiva, a performance de um atleta pode melhorar quando ele tem uma perspetiva externa da sua atividade. Essa perspetiva pode ser dada pelo seu treinador. Complementarmente, ou mesmo quando a supervisão humana não é possível, essa análise só pode ser feita vendo ou ouvindo novamente a gravação da atividade. Como tal, é de grande utilidade uma ferramenta para a deteção e identificação de sons impulsivos aplicada, em particular, a eventos desportivos (por exemplo, na modalidade de ténis e padel, onde se procura identificar os sons de pancadas da raquete na bola). Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um sistema para identificação automática de sons impulsivos aplicado a eventos desportivos, ou seja, um assistente de treinador.

Um som impulsivo sonoro pode ser caracterizado pela sua curta duração, onde a sua energia tem um crescimento rápido inicialmente ("onset or attack") seguido de um decaimento ("decay/release") que depende do ambiente acústico onde o som é gerado. Efetivamente, a reverberação do espaço tem uma grande influência na duração do som impulsivo. Todavia, em detalhe, existem outras características que é necessário extrair do sinal acústico de

forma a distinguir e identificar um som impulsivo, nomeadamente, as tonais. Todas essas características, assim como as variáveis associadas à escolha do modelo de classificação a utilizar, representam um vasto conjunto de hiper-parâmetros (HyP), que geram espaço de pesquisa de grande dimensão. É sabido que, por maior que seja o conhecimento e experiência na área do áudio e da Inteligência Artificial, é praticamente impossível prever, à partida, a configuração dos HyP mais adequada ao problema. Além disso, os algoritmos de aprendizagem profunda (“deep-learning”) têm demonstrado bons resultados, contudo, esses algoritmos têm um espaço de pesquisa (“search space”) ainda maior do que os algoritmos tradicionais de Aprendizagem Automática (“machine learning”). Nesse sentido, este trabalho está focado na exploração do espaço de HyP na procura dos valores que otimizem o desempenho de todo o processo de classificação automática de sons impulsivos.

2. ESTADO DA ARTE

A utilização de uma abordagem de Inteligência Artificial (AI) no campo da deteção e identificação de sinais acústicos, mais concretamente, na classificação de sons impulsivos, tem tido bastante investigação e avanços significativos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Têm sido propostas várias técnicas para a deteção e identificação de sons impulsivos. No trabalho [1] é feita uma análise sobre algumas das técnicas mais utilizadas, e é proposto um método caracterizado por duas fases: primeiro detecta os sons impulsivos e, em seguida, a janela encontrada é passada para a parte de identificação. Técnicas de machine learning e deep-learning, têm provado conseguir classificar sons impulsivos com boa precisão. Uma das técnicas mais utilizadas é a aprendizagem supervisionada, onde os modelos são treinados com conjuntos de dados etiquetados (“labeled datasets”). Com o avançar da tecnologia e a disponibilidade de melhores recursos computacionais, modelos mais complexos, nomeadamente, redes neuronais profundas, podem ser treinados para se alcançar o estado da arte sob o ponto de vista do desempenho, na classificação de sons impulsivos. Atualmente, existem plataformas que permitem criar, treinar e lançar modelos de Machine Learning e Deep Learning na nuvem (“cloud-based solutions”), como é o caso da Amazon SageMaker, da Microsoft Azure Machine Learning, da Google Cloud AI Platform, da H2O.ai, entre outras. Aquelas plataformas disponibilizam os recursos computacionais necessários para lidar de forma eficiente com conjuntos de dados de grande dimensão. Existem também estruturas/bibliotecas de software, tais como, o TensorFlow (desenvolvido pela Google), o PyTorch (desenvolvido pela Facebook), Apache MXNet, e o Scikit-Learn, que permitem a criação de algoritmos de machine learning e deep-learning do zero.

As Redes Neuronais Convolucionais (CNNs) têm sido uma das técnicas mais utilizadas na classificação de sons. Um exemplo disso é o trabalho [9]. Este tipo de rede

neural é o mais adequado atualmente para trabalhar com classificação de imagens. A ideia é representar o som através de imagem, e para isso, considera-se a imagem do espectrograma ou Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs). No artigo [10] é demonstrado que este tipo de redes é capaz de obter excelentes resultados na classificação de áudio quando comparado com uma rede neuronal simples (“fully connected”), ou com arquiteturas anteriores de classificação de imagem.

Para explorar o espaço de hiper-parâmetros, existem atualmente várias técnicas e algoritmos. As abordagens mais conhecidas e tradicionais são a grid-search e a random-search, as quais estão explicadas na literatura sobre otimização de hiper-parâmetros (“Hyperparameter Optimization”) [11, 12]. Com o aumento do volume de dados e do espaço de HyP, a técnica grid-search tem um custo computacional muito elevado [12, 13]. Testar uma única configuração de hiper-parâmetros em datasets de grandes dimensões, pode, nos dias de hoje, facilmente ultrapassar várias horas e levar até vários dias [13]. Existem outras abordagens mais avançadas para uma exploração mais eficiente do espaço de hiper-parâmetros, como a Otimização Bayesiana (Bayesian-optimization) e o HyperBand, que aceleram as avaliações das diferentes configurações de hiper-parâmetros em comparação com os métodos exaustivos, como o grid-search [11]. O algoritmo Bayesian-optimization é considerado um dos algoritmos que representam o estado da arte na otimização de hiper-parâmetros [12, 13].

Nos últimos anos, foram lançadas várias bibliotecas e estruturas que implementam aquelas técnicas. Algumas das bibliotecas mais populares são: Scikit-optimize; Hyperopt; Keras tuner; e Optuna.

A classificação de sons impulsivos é uma área de investigação em pleno desenvolvimento, com vários desafios a serem enfrentados. É necessário lidar com conjuntos de dados desequilibrados, enquanto a quantidade e qualidade dos dados deve permitir manter a robustez do modelo em diferentes condições (e.g. ambiente indoor; outdoor), e ainda, lidar com o ruído do mundo real.

3. METODOLOGIA

O sistema para identificação automática de sons impulsivos é implementado com foco na exploração do espaço de hiper-parâmetros, na procura dos valores que otimizem o desempenho de todo o processo de classificação automática de sons impulsivos. A implementação contempla duas fases distintas: uma fase em que são gerados os datasets considerando os HyP_data e guardando-se os parâmetros que deram origem a cada dataset; e uma outra fase que é o processamento de cada dataset usando os HyP_learn.

Com esta metodologia pretende-se estudar o impacto de diferentes características do dataset no desempenho do modelo. Como tal, é essencial que os conjuntos de dados sejam gerados automaticamente e com código genérico.

O desenvolvimento do sistema é feito usando a linguagem de programação Python. A escolha foi feita considerando o vasto ecossistema de bibliotecas e frameworks desenhadas especialmente para o desenvolvimento de modelos de Inteligência Artificial (e.g. TensorFlow; Keras; Scikit-Learn); as bibliotecas disponíveis para o processamento de sinais de áudio (e.g., Librosa); e as bibliotecas para manipulação e processamento de dados (e.g. NumPy; Pandas).

3.1. Recolha de dados

Os dados utilizados na construção dos datasets provêm de vídeos de competições (profissionais ou amadoras) de eventos desportivos, nomeadamente, ténis e padel. Desses vídeos, é extraído o áudio e é gravado em formato wav (waveform), uma vez que este é um formato de arquivo sem perdas e, como tal, a representação mais próxima do áudio original.

Existem diversos conjuntos de dados (datasets) de áudio disponíveis na internet para fins de pesquisa e desenvolvimento na área da inteligência artificial e processamento de sinais, em aplicações como, processamento de fala, reconhecimento de voz, classificação de sons ambientais, entre outros. Alguns exemplos: URBANSED; ESC-50; DCASE 2016; Freesound; e MIVIA Audio Events Dataset. Considerando os sons impulsivos em particular, os dados mais comuns disponíveis são de sons de disparos de arma (“gun shots”). Assim, não sendo fácil encontrar conjuntos de dados específicos de áudio de jogos de padel disponíveis publicamente, é necessário criar manualmente o próprio conjunto de dados, através da captação directa de vídeos, ou a recolha de vídeos já gravados e disponíveis publicamente – no YouTube por exemplo.

No caso de ser feita a captação manual de vídeos, é utilizada câmara com microfone externo, e os sinais de áudio são capturados a uma alta frequência de amostragem (“sampling rate”) de forma a preservar-se a fidelidade da natureza impulsiva do som. No estudo [4] por exemplo, o áudio foi capturado a uma frequência de amostragem de 204,8 kHz.

O conjunto total dos vídeos deve representar variabilidade das condições com efeito nas características acústicas. Ou seja, ambientes interiores e exteriores (indoor e outdoor), e diferentes condições, tais como, humidade no ar, nível de ruído ambiental, e diferentes distâncias do microfone que correspondem a diferentes níveis da relação sinal-ruído.

3.2. HyP (híper-parâmetros)

O conceito de HyP refere-se, em geral, aos valores escolhidos para configuração de determinado algoritmo a executar num processo de Aprendizagem Automática [11]. Esse algoritmo tem como "input" um "dataset" (os excertos de áudio) que o algoritmo processa visando aprender (descobrir) padrões

contidos nesses dados. O "dataset" é, portanto, a base (a "matéria-prima") de todo o processo. Neste trabalho propomos estender o conceito de HyP de modo a englobar também a construção do próprio "dataset".

Temos 2 conjuntos de HyP: a) os usados para geração do "dataset" (HyP_data), e b) os usados pelo algoritmo que processa o "dataset" visando aprender a partir desses dados (HyP_learn); de modo mais formal, temos $HyP = \{HyP_data, HyP_learn\}$. Neste trabalho, os dados representam excertos de áudio, pelo que HyP_data separa-se ainda em dois sub-conjuntos: a) os que estão ligados à amostragem do sinal de áudio, e como tal, são "globais" a todo o restante processamento (HyP_data_global), e b) os que são usados na extração de características ("features") desse sinal de áudio (HyP_data_feature); temos então $HyP_data = \{HyP_data_global, HyP_data_feature\}$.

Os esquemas de HyP (HyP_data e HyP_learn) a considerar, são definidos e representados formalmente numa estrutura de dados persistente e separada do código, contendo o intervalo de valores dos HyP. Assim, o utilizador pode alterar aquele intervalo de valores, e reiniciar o sistema, sem a necessidade de alteração do código.

3.3. Extração de características do áudio

Com base na noção geral do que distingue um som impulsivo, são identificadas as características potencialmente relevantes. Essas características são extraídas do áudio a partir da sua representação em vários domínios: no domínio do tempo; da frequência; e na representação tempo-frequência.

É feito um varrimento sobre o áudio com uma janela temporal de dimensão fixa – ‘Event_length’ – de acordo com a duração do evento sonoro que se pretenda considerar. Esse varrimento é feito em várias iterações, onde em cada iteração a janela desliza um número específico de amostras – ‘Number_of_shifted_samples’. A janela é dividida em segmentos – ‘Number_of_segments’ – e a extração das características é feita sob as amostras abrangidas por cada segmento (e não sob o total de amostras da janela), de forma a preservar o contexto temporal. O número de amostras abrangidas depende também da frequência de amostragem do áudio – ‘Bandwidth’. Esta técnica é inspirada no trabalho desenvolvido em [14]. A Figura 1 ilustra o processo de varrimento sobre o áudio para extração de características.

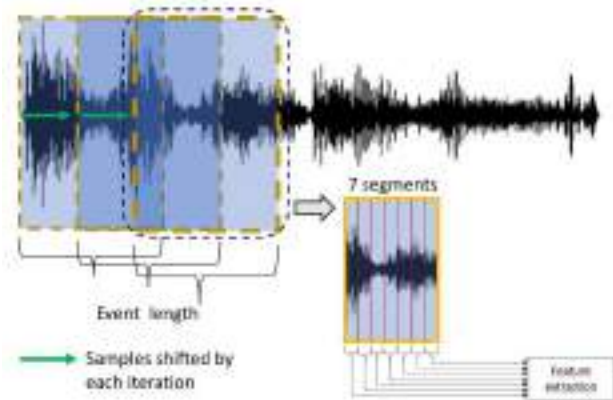


Figura 1. Varrimento sobre o áudio para extração de características, com um exemplo de Number_of_segments = 7.

3.4. Conjunto de dados (Dataset)

Propõe-se, neste trabalho, estender o conceito de HyP de modo a englobar também a construção do próprio "dataset". Assim, e tal como explicado no capítulo 3.2 deste documento, podem ser explorados diferentes esquemas de HyP_data (e.g. diferentes features; diferentes intervalos de valores dos parâmetros do varrimento do áudio para a extração de features), sem a necessidade de alteração do algoritmo do sistema. Os datasets são gerados de raiz, automaticamente, com código genérico e apenas dependente da declaração dos HyP_data. Cada configuração de valores dos HyP_data dá origem a um dataset diferente.

A matriz de características é construída com os valores obtidos através do processo descrito no capítulo 3.3 deste documento.

Sobre os dados recolhidos para a geração dos datasets, é feita a anotação manual de eventos sonoros através da percepção do ouvido humano sobre o som impulsivo em questão. Essa anotação é usada na criação automática do vector de classes. Assim, temos aprendizagem supervisionada, guiada pela relação entre o ouvido humano e a construção do dataset.

Para equilibrar o dataset, é considerada a técnica de sub-amostragem, uma vez que, o número pancadas da raquete na bola é muito inferior ao ruído de fundo. O objetivo é reduzir o número da classe em maioria [15], neste caso, a classe do ruído de fundo.

Para gerar os dataset, o processo proposto pode ser descrito pela Figura 2.

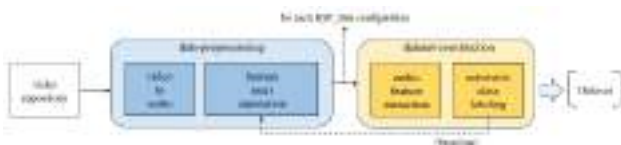


Figura 2. Processo de construção do dataset.

3.5. Modelo

Conforme referido anteriormente, é praticamente impossível prever, à partida, a configuração dos HyP mais adequada ao problema. O sistema explora automaticamente o espaço de HyP_learn definido, alimentado pelos datasets gerados.

É utilizada a técnica da validação cruzada (cross-validation) para avaliar a capacidade de generalização do modelo, e para evitar uma medição enviesada do desempenho (resultante de um possível conjunto de teste com exemplos mais fáceis de classificar). É também utilizada a técnica de Stratified K-Fold, de forma a preservar uma distribuição idêntica de exemplos de cada classe em cada fold, em relação ao dataset original.

Para explorar o espaço de HyP_learn, são utilizadas as técnicas grid-search e Bayesian-optimization, sendo o espaço de pesquisa definido no esquema HyP_learn. A técnica Bayesian-optimization é especialmente útil quando a busca é realizada em hiper-parâmetros que têm espaços de valores contínuos, como é o exemplo do 'Learning-rate' das Feed-forward Neural Network.

Quando o mesmo procedimento de validação cruzada e o mesmo dataset são usados tanto para ajustar (os HyP_learn) como para selecionar um modelo, é provável que isso leve a uma avaliação otimisticamente tendenciosa do desempenho do modelo [16]. Para evitar esse problema, e obter uma medida de desempenho e capacidade de generalização mais realista do modelo, neste trabalho é utilizada a técnica Nested Cross-Validation (também conhecida por 'double cross-validation'). Esta técnica combina duas camadas de validação cruzada: uma camada externa para avaliar o desempenho geral do modelo, e uma camada interna para otimizar os HyP_learn do modelo. A camada interna é 'aninhada' ("nested") na camada externa. A implementação desta técnica consiste em dividir o dataset em K folds para a camada externa ("outer cross-validation"), e com o conjunto de treino de cada fold (da camada externa) é executada a camada interna, na qual é feita a otimização dos HyP_learn. Esse conjunto (set) da camada interna é dividido noutros k folds ("inner cross-validation") com conjunto de treino e conjunto de validação. Assim, a avaliação de cada configuração de HyP_learn não tem a oportunidade de se superajustar ao dataset original, pois está exposta apenas a um subconjunto do conjunto de dados fornecido pelo procedimento de validação cruzada externa. Nesta implementação é utilizada a biblioteca Scikit-learn, em particular, as funções 'GridSearchCV' e 'BayesSearchCV', para a camada interna. Na camada externa é avaliado, com o conjunto de teste, o desempenho geral do modelo otimizado (pela camada interna). No final, o desempenho apresentado será a média dos resultados dos K folds da camada externa. Na Figura 3 está representada uma ilustração demonstrativa

da técnica Nested-cross-validation, com 5 folds na camada externa e 3 folds na camada interna. É também possível visualizar, na Figura 3, o conjunto de dados de validação na camada interna (associado à avaliação de hiper-parâmetros na fase de treino), e o conjunto de dados de teste na camada externa (associado à avaliação do modelo).

Antes do dataset ser processado pelo modelo, é usada uma técnica de pré-processamento para standardizar a escala das features. É usada a função ‘StandardScaler’ da biblioteca ‘sklearn.preprocessing’, para remover a média e dimensionar o valor das features de acordo com a variância.

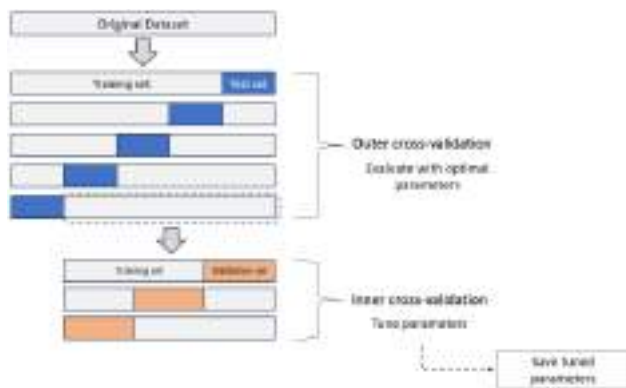


Figura 3. Técnica Nested-cross-validation, com 5 folds na camada externa e 3 folds na camada interna.

Para automatizar o passo de pré-processamento (‘StandardScaler’) seguido do classificador, foi criado um Pipeline (da biblioteca sklearn.pipeline).

No final do processo, são apresentados os resultados do desempenho de todos os modelos, assim como, os melhores hiper-parâmetros de cada modelo.

4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste trabalho o objetivo de aprendizagem é o da identificação automática de sons impulsivos relacionados com atividades desportivas.

De forma a realizar-se um teste e obter-se os primeiros resultados intermédios, e seguindo a metodologia descrita no capítulo 3 deste documento, foram considerados os $HyP_data_global = \{Event_length, Number_of_segments, Bandwidth, Number_of_shifted_samples\}$, e os $HyP_data_feature = \{Onset-Detect; Root-Mean-Square, Band-Energy-Ratio, Spectral-flux\}$. A escolha de alguns daqueles HyP_data foi baseada em trabalho relacionado [14], onde a sua utilização teve bons resultados. Foi testado apenas um hiper-parâmetro, o ‘Number_of_shifted_samples’, com o espaço de pesquisa de valores [4096, 2048, 1024], o que resultou em 3 configurações de HyP_data , e assim, foram gerados 3 datasets (descritos na Tabela 1 como ‘DS-1’, ‘DS-2’ e ‘DS-3’ respetivamente). Como fonte de dados para a

geração dos datasets, foram recolhidos vídeos de jogos de padel que totalizam um tempo de gravação de aproximadamente 29 minutos. A amostragem (Bandwidth) foi feita a 44100Hz; considerou-se um ‘Event_length’ de 0.5 segundos; e o ‘Number_of_segments’ foi ajustado com a variação de ‘Number_of_shifted_samples’. Com as configurações acima indicadas, foram gerados datasets com cerca de 8000, 15800 e 31700 instâncias respetivamente. Relativamente aos HyP_learn , foram considerados dois algoritmos para a classificação – Feed-forward Neural Network e Support Vector Machine – descritos na Tabela 1 como ‘MLP’ e ‘SVM’ respetivamente, e consideraram-se alguns dos HyP_learn pertencentes àqueles algoritmos, tendo-se definido um intervalo de valores para cada um deles. A escolha dos algoritmos MLP e SVM para os primeiros testes deveu-se ao facto de eles terem apresentado bons resultados em trabalhos relacionados [14, 9, 1, 2, 3, 5, 8]. Para a técnica Nested-cross-validation foi definida uma configuração com 10 folds na camada externa e 3 folds na camada interna, sendo que estes valores podem também ser considerados HyP_learn . Na Tabela 1 são mostrados os resultados com as técnicas grid-search e Bayesian-optimization, considerando o espaço de busca definido na Tabela 2.

Tabela 1. Resultados de alguns dos primeiros testes preliminares. Legenda: lr - ‘learning_rate’; mi - ‘max_iter’; BS - Bayesian Search; GS - Grid Search.

Dataset	Modelo	Score (Accuracy)	Melhores HyP_learn
DS-3	MLP	0.930653	‘lr’: 0.000600., ‘mi’: 76. (GS)
DS-3	MLP	0.929235	‘lr’: 0.001036, ‘mi’: 67. (BS)
DS-3	SVM	0.928574	‘C’: 31. (BS)
DS-3	SVM	0.928574	‘C’: 31. (GS)
DS-2	MLP	0.921098	‘lr’: 0.001360, ‘mi’: 44. (BS)
DS-2	MLP	0.920090	‘lr’: 0.0016, ‘mi’: 36. (GS)
DS-2	SVM	0.919018	‘C’: 19. (GS)
DS-2	SVM	0.918640	‘C’: 23. (BS)
DS-1	MLP	0.900521	‘lr’: 0.0041, ‘mi’: 86. (GS)
DS-1	MLP	0.899885	‘lr’: 0.002799, ‘mi’: 78. (BS)
DS-1	SVM	0.894536	‘C’: 36. (BS)
DS-1	SVM	0.894408	‘C’: 28. (GS)

Este trabalho encontra-se em desenvolvimento. Contamos ter mais resultados na data da conferência.

Tabela 2. Espaço de busca de HyP_learn para os testes preliminares.

Model	HyP_learn	Range of values (start, stop, step (if applicable))
MLP	learning rate	0.0001, 0.01, step = 0.0005 for the grid-search
MLP	max iterations	1, 100, step = 5 for the grid-search
SVM	C	1, 40, step = 3 for the grid-search

5. CONCLUSÕES

Os testes iniciais permitem algumas conclusões preliminares. Desde logo, sobre os datasets gerados a partir das várias configurações de HyP_data – em particular, a variação do ‘Number_of_shifted_samples’ – verifica-se que o varrimento sobre o áudio com um deslizamento menor da janela resulta num dataset com mais instâncias, e o modelo tem melhor desempenho. Esse melhor desempenho do modelo pode justificar-se não apenas pela dimensão do dataset, mas também pelo significado de um deslizamento menor da janela, ou seja, uma maior probabilidade de captar a janela temporal exata da ocorrência do evento. Sobre os algoritmos de classificação testados – MLP e SVM – o resultado mostra um desempenho equivalente, embora com ligeira vantagem do MLP, pelo que terão de ser realizados testes mais completos e com todos os HyP_learn daqueles algoritmos. Quanto às técnicas de pesquisa de hiper-parâmetros – grid-search e Bayesian-optimization – verificaram-se as suas vantagens e desvantagens já documentadas na literatura [11, 13], e nesse sentido, a Bayesian-optimization tem mostrado ser a técnica mais adequada para este problema, uma vez que lidamos com uma grande dimensão do espaço de configurações.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Arslan, Yüksel (2017) "Impulsive Sound Detection by a Novel Energy Formula and its Usage for Gunshot Recognition" *arxiv.org* <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.08759>.
- [2] Rabaoui, A., H. Kadri, and N. Ellouze (2008) "New approaches based on One-Class SVMs for impulsive sounds recognition tasks" *Published in: 2008 IEEE Workshop on Machine Learning for Signal Processing*, DOI <https://doi.org/10.1109/MLSP.2008.4685494>.
- [3] Suliman, Azizah, Batyrkhan Omarov, and Zhandos Dosbayev (2020) "Detection of impulsive sounds in stream of audio signals" *Published in: 2020 8th International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU)*, DOI <https://doi.org/10.1109/ICIMU49871.2020.9243540>.
- [4] Tardif, Bruno, David Lo, and Rafik Goubran (2021) "Gunshot Sound Measurement and Analysis" *Published in: 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* DOI <https://doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530145>.
- [5] Hrabina, Martin, and Milan Sigmund (2018) "Gunshot recognition using low level features in the time domain" *Published in: 2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, DOI <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2018.8376372>.
- [6] Nalla, Ravali, Macarena Varela, and Marc Oispuu (2021) "Evaluation of Image Classification Networks on Impulse Sound Classification Task" *Published in: 2021 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, DOI <https://doi.org/10.1109/MFI52462.2021.9591202>.
- [7] Smailov, Nurzhigit; Dosbayev, Zhandos; Omarov, Nurzhan; Sadykova, Bibigul; Zhekambayeva, Maigul; et al (2023) "A Novel Deep CNN-RNN Approach for Real-time Impulsive Sound Detection to Detect Dangerous Events" *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, West Yorkshire*, DOI:10.14569/IJACSA.2023.0140431.
- [8] Ahmed, Talal, Momin Uppal, and Abubakr Muhammad (2013) "Improving efficiency and reliability of gunshot detection systems" *Published in: 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, DOI <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6637700>.
- [9] Boixeda, Martí Bolet, and Elisa Sayrol (2019) "Urban Sounds Classification using Deep Learning" *Universitat Politècnica de Catalunya*, Thesis, Degree in Telecommunications Engineering.
- [10] S. Hershey, S. Chaudhuri, Ellis, DP, Gemmeke, JF, et al. (2017) "CNN Architectures for Large-Scale Audio Classification" *arxiv.org* <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.09430>.
- [11] Agrawal, Tanay (2021) "Hyperparameter Optimization in Machine Learning" *Apress*, ISBN-13 (electronic): 978-1-4842-6579-6.
- [12] Elshawi, Radwa, Mohamed Maher, and Sherif Sakr (2019) "Automated Machine Learning: State-of-The-Art and Open Challenges" *arxiv.org* <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02287>.
- [13] Feurer, Matthias, and Frank Hutter (2019) "AutoML Methods - Hyperparameter Optimization", in Frank Hutter, Lars Kotthoff, and Joaquin Vanschoren (eds) *Automated Machine Learning. Methods, Systems, Challenges*, The Springer Series on Challenges in Machine Learning, ISBN 978-3-030-05317-8.
- [14] Fernandes, Carina, Paulo Trigo, Joel Paulo, and Paulo Vieira (2022) "Anotação de Eventos Sonoros em Vídeo" *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL)*, final course project, Degree in Informatics and Multimedia Engineering.
- [15] Badr, Will (2019) "Having an imbalanced dataset? Here is how you can fix it." *Towards Data Science*.
- [16] Brownlee, Jason (2021) "Nested Cross-Validation for Machine Learning with Python" *Machine Learning Mastery*.

MEJORAS EN LA DETECCIÓN DE EVENTOS ACÚSTICOS MEDIANTE LA PONDERACIÓN DE DESEQUILIBRIO DE ACTIVIDAD Y PREDICCIONES DÉBILES BASADAS EN EL MÁXIMO

Carlos M. Castorena^{1*}
Maximo Cobos¹
Francesc J. Ferri¹

¹Universitat de Valencia. Dept. Informatica 46100 Burjassot (Valencia) , España

RESUMEN

La detección de eventos de sonido es uno de los temas más relevantes en el procesamiento de audio con redes neuronales artificiales. En este trabajo, se presentan dos estrategias muy simples para mejorar la detección de eventos de audio en el sistema de base propuesto en el reto internacional DCASE (Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events) 2022. La primera estrategia propuesta se enfoca en mejorar la generación de predicciones débiles a partir de las predicciones de actividad del sistema. Esto resulta en un cálculo de pérdida más sólido y coherente para ejemplos con etiquetas débiles, lo que a su vez mejora la capacidad del sistema para identificar eventos de audio con mayor precisión.

La segunda estrategia se basa en una pérdida ponderada de entropía cruzada binaria, que tiene en cuenta el desequilibrio resultante de la actividad de eventos en cada lote de entrenamiento. Esto garantiza que el sistema se entrene de manera más equilibrada y pueda capturar de manera efectiva los eventos de audio en diferentes proporciones. La combinación de ambas estrategias ha demostrado resultados interesantes, ya que se lograron mejoras en el rendimiento del sistema sin requerir un esfuerzo considerable en el diseño y entrenamiento del mismo.

ABSTRACT

Sound event detection is one of the most relevant topics in audio processing with artificial neural networks. In this work, two very simple strategies are presented to enhance audio event detection in the baseline system proposed in the 2022 DCASE (Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events) international challenge. The first proposed strategy focuses on improving the generation of weak predictions from the system's activity predictions. This

results in a more robust and coherent loss computation for examples with weak labels, which in turn enhances the system's ability to identify audio events more accurately.

The second strategy is based on a weighted binary cross-entropy loss, which takes into account the imbalance resulting from event activity in each training batch. This ensures that the system is trained in a more balanced manner and can effectively capture audio events in different proportions. The combination of both strategies has demonstrated interesting results, as improvements in system performance were achieved without requiring considerable effort in its design and training.

Palabras Clave— detección de eventos de sonido, desbalance, error ponderado de entropía cruzada.

1. INTRODUCCIÓN

La tarea de detectar eventos de sonido en entornos domésticos del desafío "Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2022 (DCASE2022)" consiste en diseñar sistemas que no solo predigan la presencia o ausencia de los 10 eventos domésticos considerados, sino que también proporcionen sus límites temporales. Para el entrenamiento se cuenta con 10,000 audios sintéticos con una duración de 10 segundos cada uno, que tienen su respectiva etiqueta con marcas de tiempo (etiquetado fuerte), 1,578 audios reales que solo tienen su etiqueta débil (solo se identifica la presencia del sonido) y, además, se cuenta con 14,412 muestras de audio sin etiquetar [1].

La metodología base para el desafío, consta en una red neuronal convolucional recurrente (CRNN, por sus siglas en inglés), donde varias capas convolucionales funcionan como extractores de características y las capas recurrentes analizan los mapas de características de salida de manera secuencial, adicionalmente una serie de capas densas realizan las funciones de clasificación. El modelo toma

* **Autor de contacto:** carlos.castorena@uv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

como entrada el espectrograma de Mel normalizado de segmentos de audios de 10 segundos, durante el entrenamiento, 12 muestras con etiquetado fuerte, 12 muestras con etiquetado débil y 24 muestras sin etiquetar conforman un lote de entrenamiento. El error total a optimizar se compone por tres tipos de errores: el error fuerte y débil, que se calcula con la entropía cruzada binaria de las muestras del lote que cuenten con su respectivo etiquetado ya sea fuerte o débil, y el error de consistencia que se calcula con un error cuadrático medio de las muestras sin etiquetas. La salida de este modelo son las predicciones fuertes, una matriz que contiene la información de las activaciones en distintos fotogramas y las predicciones débiles, que se representan en forma de vector e indica la presencia o ausencia de un evento [2].

Es común que haya una diferencia significativa de muestras de distintas clases, esto se le conoce como desbalance, en términos del problema de detección de eventos de audio podemos encontrar dos tipos, el primero a nivel evento, referente a la diferencia que hay de muestras entre los distintos eventos, por ejemplo, en los datos hay mas audios que presentan el evento “Perro” que el evento “Aspiradora”. En segundo lugar a nivel fotograma, cuando el número de fotogramas con activación y aquellos que no tienen ningún evento es considerablemente diferente, esto pasa cuando los eventos son demasiado cortos respecto a los 10 segundos de la duración total [3]. Este problema de desequilibrio, al igual que en otros contextos, suele perjudicar el rendimiento de la red neuronal durante su entrenamiento [3]. El uso de funciones de pérdida que contrarresten los efectos negativos de los problemas de desequilibrio de actividad suele llevar a resultados generales mejores [4].

2. METODOLOGÍA

En este trabajo, se proponen dos modificaciones principales al modelo base. La primera se refiere a la forma en que se calculan las predicciones débiles, mientras que la segunda tiene como objetivo incluir mecanismos de pérdida ponderada para reducir los efectos del desequilibrio entre fotogramas activos y no activos. Estas modificaciones se describen a continuación.

2.1. Predicción débil

La salida del modelo base corresponde a la secuencia temporal de probabilidades de actividad de clase, donde para cada fotograma de tiempo se proporciona una probabilidad de actividad para cada clase, a lo que nos referiremos como predicciones fuertes. Sin embargo, es importante notar que el modelo utiliza ejemplos con etiquetas tanto fuertes como débiles para actualizar los pesos

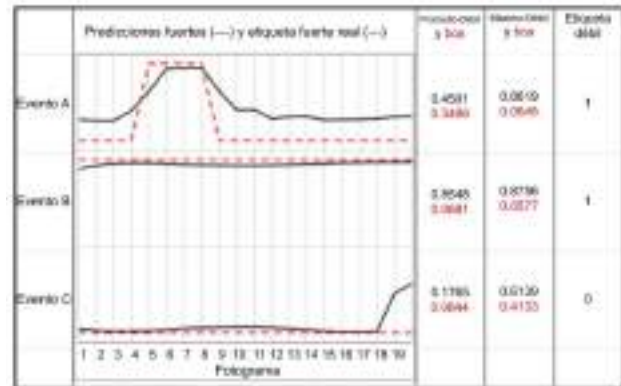


Figura 1. Representación de las predicciones débiles

durante el entrenamiento. Para ejemplos de audio con etiquetas fuertes, está disponible una secuencia de actividad de clase fotograma a fotograma, que se puede comparar directamente con la salida del modelo. Para ejemplos con etiquetas débiles, solo está disponible una etiqueta binaria que indica la presencia de un evento de clase a lo largo de toda la duración del ejemplo. Para tales ejemplos, se genera una predicción débil a partir de la salida del modelo fotograma por fotograma, tomando el promedio de todos los fotogramas. Es importante destacar que una etiqueta débil también se puede obtener a partir de ejemplos con etiquetas fuertes generando una etiqueta de "1" siempre que haya algún fotograma con actividad para cualquiera de las clases. Por último, los ejemplos sin etiquetar se tratan siguiendo el enfoque semisupervisado estudiante-profesor del modelo base.

Una dirección de mejora se refiere a la forma en que se tratan las predicciones débiles en el modelo base. Actualmente, cuando no se utiliza la capa de atención, la predicción débil se calcula a partir del promedio de las predicciones fuertes (*Promedio-Débil*), de modo que la función de costo de entropía cruzada binaria (*bce*) empujará las predicciones de todos los fotogramas del mismo evento hacia "1", contradiciendo la salida natural del modelo fotograma a fotograma. Por esta razón, se propone usar el valor máximo de las predicciones fuertes como predicción débil (*Máximo-Débil*), reemplazando el promedio. De esta manera, se espera que las predicciones débiles correspondientes sean "1" cuando haya al menos un fotograma activo para una clase de evento determinada. La Figura 1 muestra la diferencia entre ambos cálculos. El evento A está activo solo en un pequeño número de fotogramas, lo que lleva a una predicción *Promedio-Débil* pequeña y una pérdida *bce* alta, mientras que la predicción *Máximo-Débil* refleja mejor el hecho de que el evento está presente, como se deduce de la predicción fuerte. Cuando un evento está activo en todos los fotogramas (Evento B), casi

no hay diferencia entre *Promedio-Débil* y *Máximo-Débil*. Finalmente, el Evento C no está activo, pero la predicción fuerte indica incorrectamente actividad de clase, lo que se traduce adecuadamente en un valor significativo de pérdida cuando se usa *Máximo-Débil*, pero no tanto para *Promedio-Débil*.

2.2. Entropía cruzada binaria ponderada

Para balancear los datos, se utiliza una entropía cruzada binaria ponderada (*bce* por sus siglas en inglés), aplicando un factor w que pondera el error de manera diferente y proporcional según la etiqueta. La función de pérdida se define como:

$$wbce(x, y) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (1-w) \cdot y_s \cdot \log(x_s) + w \cdot (1-y_s) \cdot \log(1-x_s), \quad (1)$$

donde S es el número de muestras en el lote (batch), y_s y x_s son las etiquetas y las predicciones correspondientes para la muestra s , respectivamente. Es importante destacar que tanto x_s como y_s son vectores en R^T cuando se usan etiquetas débiles, o matrices en $R^{T \times K}$ cuando se tratan etiquetas fuertes, donde K es el número de clases de eventos y T es el número de fotogramas temporales considerados. El peso w se elige como la proporción de eventos activos en el lote con respecto al número total de eventos en ese lote. Cuando y_s es una etiqueta débil, w se calcula de la siguiente manera:

$$w = \frac{\sum_{s=1}^S \left(\frac{\sum_{k=1}^K y_s^k}{K} \right) + 1}{S+1}. \quad (2)$$

Es importante notar que w representa la densidad de eventos en el lote: cuando w está cerca de 0, esto significa que hay pocas muestras en el lote con eventos activados, mientras que cuando está cerca de 1, casi cada muestra tiene todos los eventos activos simultáneamente. Por otro lado, al calcular la pérdida para una etiqueta fuerte, utilizamos:

$$w = \frac{\sum_{s=1}^S \left(\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T y_s^{(t,k)}}{T \cdot K} \right) + 1}{S+1}, \quad (3)$$

donde en este caso w representa la proporción de fotogramas activados en el lote. Es relevante notar que tanto para etiquetas fuertes como débiles, un y_s completamente

compuesto de ceros resulta en $w=0$, lo que produce una pérdida nula independientemente de la predicción x_s . Para abordar esta situación, se suma uno al numerador y al denominador.

2.3. Configuraciones del sistema

La codificación de los sistemas se componen por las estrategias aplicadas durante el entrenamiento, en primer lugar, cuando se aplica *wbce* se incluye la palabra "Balanceado" unido con un gion al tipo de etiqueta (Fuerte o Débil) indicando que se aplica el error ponderado, por ejemplo, si se ha aplicado *wbce* al error fuerte, el nombre incluiría "*Fuerte-Balanceado*", de lo contrario, solo aparecerá "*Fuerte*" que indica que no hay modificación a este tipo de error. En segundo lugar, hay dos posibilidades para la predicción débil, "*Promedio-Débil*" y "*Máximo-Débil*", la primera correspondiente al baseline y la segunda como una propuesta de mejora, un ejemplo de esta codificación es: "*Máximo-Débil-Balanceado*" que indica que es utilizada la estrategia basada en el máximo para el cálculo de la etiqueta débil y al mismo tiempo el cálculo del error débil es ponderado. Finalmente en aquellas estrategias en las que es aplicada una capa de atención se indica con la palabra "Atención". Se pruebas diferentes combinaciones generando un total de 10 experimentos aplicando las estrategias propuestas, mas dos sistemas de referencia.

3. RESULTADOS

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos para los diferentes sistemas evaluados. En el eje x se presenta la puntuación de Detección de Eventos Sonoros Polifónicos [5] (*PSDS*, por sus siglas en inglés) para el escenario 1, que se enfoca principalmente en cuán rápido se detecta una activación. En el eje y , se muestra la *PSDS* para el escenario 2, que mide la confusión entre eventos. Entre los métodos propuestos, los mejores resultados en cuanto a la métrica *PSDS1* se obtienen para los sistemas que utilizan *Máximo-Débil*, ocupando las primeras 5 posiciones. Sin embargo, en cuanto a la *PSDS2*, su rendimiento disminuye considerablemente, excepto cuando se equilibran tanto las predicciones débiles como las fuertes ("*Fuerte+Máximo-Débil-Balanceado*").

Los sistemas presentados en la Competencia por obtener los mejores resultados se indican en azul. Los 3 métodos se basan en el balanceo de actividad propuesto ya sea en el error fuerte, débil o una combinación de ambos. El sistema "*Fuerte+Promedio-Débil-Balanceado*" presenta un ligero aumento en la métrica *PSDS-escenario2* con respecto al modelo base. El sistema "*Fuerte+Máximo-Débil-Balanceado*" tiene un buen rendimiento en comparación con el modelo base con capa de atención en la métrica *PSDS-*

escenario1 y, finalmente, "Fuerte-Balanceado+Máximo-Débil-Balanceado" muestra un resultado competitivo para ambas métricas.

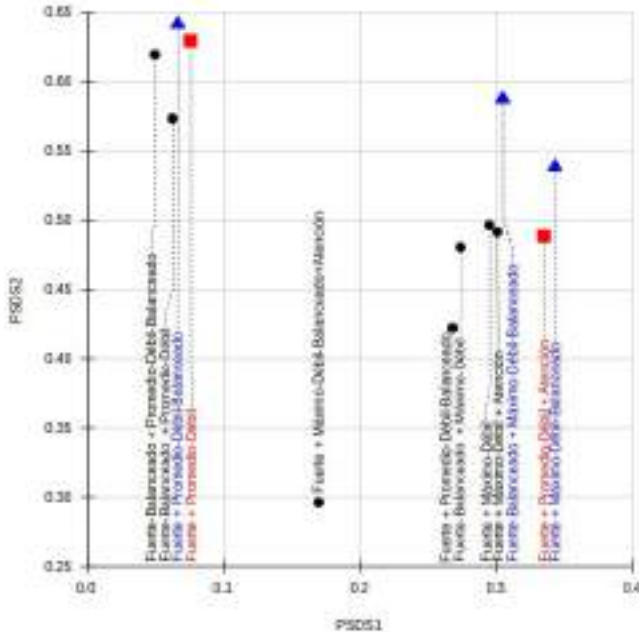


Figura 2. Resultados de PSDS para las estrategias propuestas y metodologías base.

Cuando se utiliza el ponderado por desequilibrio, los resultados son mejores solo cuando no se incluye la capa de atención. Si se incluye la atención, las estrategias propuestas no son realmente efectivas, como se puede observar en los sistemas "Fuerte+Máximo-Débil-Balanceado+Atención" o "Fuerte+Promedio-Débil-Balanceado+Atención"

4. CONCLUSIONES

Se han propuesto dos cambios motivados por la actividad para el modelo base en la Tarea 4 de DCASE2022. Las estrategias propuestas, a pesar de ser muy simples, condujeron a una ligera mejora en el rendimiento del sistema base. Los resultados muestran que las estrategias de balanceo pueden llevar a ciertas ganancias de rendimiento con poco esfuerzo dentro de la etapa de entrenamiento del modelo.

5. REFERENCIAS

[1] R. Serizel, N. Turpault, A. Shah, and J. Salamon, "Sound event detection in synthetic domestic environments," in ICASSP 2020 - 45th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Barcelona, Spain, 2020.

[2] N. Turpault, R. Serizel, A. Parag Shah, and J. Salamon, "Sound event detection in domestic environments with weakly labeled data and soundscape synthesis," in Workshop on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events, New York City, United States, October 2019.

[3] K. Imoto, S. Mishima, Y. Arai, and R. Kondo, "Impact of data imbalance caused by inactive frames and difference in sound duration on sound event detection performance," Applied Acoustics, vol. 196, p. 108882, 2022.

[4] M. R. Rezaei-Dastjerdehei, A. Mijani, and E. Fatemizadeh, "Addressing imbalance in multi-label classification using weighted cross entropy loss function," in 2020 27th National and 5th International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME), 2020, pp. 333–338.

[5] A. Mesaros, T. Heittola, and T. Virtanen, "Metrics for polyphonic sound event detection," Applied Sciences, vol. 6, no. 6, p. 162, 2016

AUDIO-TO-SCORE ALIGNMENT SYSTEM TO SYNCHRONIZE MEDIEVAL CHANT RECORDINGS

Pablo Cabañas Molero¹, Raquel Cortina Parajón², Jaime García Martínez¹,
Elías F. Combarro Álvarez³, Pedro Vera Candéas^{1†}

¹Universidad de Jaén, Linares, España

²Universidad de Oviedo, Gijón, España

³Universidad de Oviedo, Oviedo, España

ABSTRACT

Medieval music has been systematically studied by scholars for over a century. Nowadays, extensive databases exist that contain transcriptions of Gregorian chants in GABC format. These databases often include additional media such as images of the original manuscripts or audio recordings of the chants. In this paper, we propose an audio-to-score alignment system to synchronize a chant in GABC format with its corresponding audio rendition. First the GABC score is converted into MIDI using fixed values for tempo and note duration (markings like punctum mora and episema are taken into account). The MIDI score is then aligned to the audio by computing a full pairwise distance matrix between audio and score sequences, and using a version of offline Dynamic Time Warping, which is very efficient in terms of memory and CPU. As a result, each single square-note (and its Latin syllable) is assigned a precise time within the audio performance. Our system demonstrates strong resilience towards variations in tempo and note duration, but unfortunately does not work with unison chants.

Keywords— medieval music, gregorian chant, gabc, audio-to-score alignment, dynamic time warping.

1. INTRODUCTION

The origins of Gregorian chant can be traced back to the 8th century. Early manuscripts recorded only the Latin texts, but over time sketches of the melodies began to appear in the form of *neumes*, symbolic figures inserted to denote melodic contours. These neumes were later accompanied by lines representing pitches, which soon evolved into the four-line square notation still used in chant books today. This notation is the predecessor of the modern five-line staff [1][2].

office-part:Antiphona;
mode:3;
%%
(c4) Quan(e)do(ed) na(g)tus(hj) es(j) (::) in(j)ef(i)fa(g)bí(i)li(j)ter(h)
ex(gf) Vír(gh)gí(gvFE)ne,(e) (;) tunc(g)

Render

Ant.
3.
Q uando na-tus es in-ef-fa-bí-li-ter ex Virgi- ne, tunc

Source

Ad Laudos et per Horas
1. Ant. Q uando natus est in 7 Versus, pag. 38. — Ps. Dicitur re-
gulari, etc. de Gregorio, pag. 38.

Quando natus es in-effa-bi-li-ter ex Virgi-ne, tunc

Figure 1. *Quando natus est* chant in GregoBase. Chant is stored in GABC format, with its rendered version and source book image.

Systematical study of Gregorian chant has been active for over a century [3]. With the advent of computers and the internet, tools emerged to digitize and preserve this early music. The main tool in this field is the Cantus Index [4], an online index of chants that provides their full text and a *Cantus ID* to identify the same chant across different databases and sources. Several databases are indexed in this catalogue, the largest one being the Cantus database [5]. This archive of chants contains about 500,000 entries, which include source (manuscript and its location), Cantus ID, image of the source, and more. Around 13% of these chants have their melodies transcribed using *Volpiano* notation, a specialized typeface designed for notating plainchant [2].

GregoBase is an online corpus that hosts around 9,000 chants of the Gregorian repertoire [6]. These chants are presented in the same way as in modern chant books like the *Liber Usualis*: modern four-line square notation with elements such as breathing marks, varied note shapes and clef changes [2]. These transcriptions are stored in GABC

[†] **Contact author:** pvera@ujaen.es

Copyright: ©2023 Pablo Cabañas Molero et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

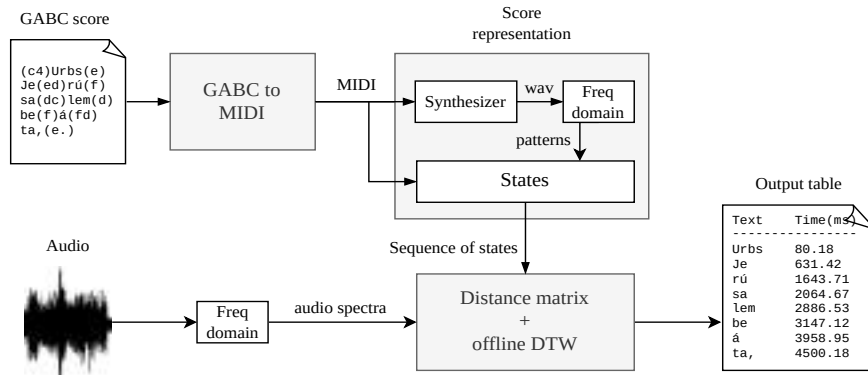


Figure 2. Block diagram of the proposed audio-to-score alignment method for Gregorian chant.

format, an elaborate TEX style notation for representing Gregorian chant using plain text, and part of the *Gregorio* project [7]. An example of chant written in GABC (with its rendered version and source) is illustrated in Figure 1. Regarding audio data, the commercial mobile application *Neumz* offers 7,000 hours of recordings of Gregorian chant [8]. Each audio is played in sync with its square-note score in the screen, which is a rendered version of a GABC transcription.

Given the amount of information stored in these databases, more and more research has been focused on providing computational methods to process and study Gregorian chant. One example is *transcript alignment*, whose purpose is to associate the transcribed chant text with its position in the manuscript image [9]. In this work, we focus on *audio-to-score alignment*, i.e., associating each square-note (and Latin syllable) of the chant to a position in an audio rendition. Even though score alignment methods for classical music have been around for almost four decades [10], to our knowledge, no previous systems have been applied to vocal plainchant. In the *Neumz* application, this alignment labor is done manually.

In this paper, we propose an audio-to-score alignment system designed to synchronize chants in GABC format with their corresponding audio representations. The method is an adaptation of the algorithm in [11], originally designed for classical music. Initially, we convert the GABC score into MIDI format while considering predefined values for tempo and note duration. Next, we align the MIDI score with the audio by calculating a pairwise distance matrix between the audio and score sequences. We employ an efficient version of offline Dynamic Time Warping (DTW), which optimizes memory and CPU usage. The algorithm assigns precise timing to each square-note within the audio performance.

In the next section, we describe our approach in detail. In section 3, our experiments on score-audio pairs taken from *Neumz* are discussed.

2. ALIGNMENT METHOD

The block diagram of the proposed method is shown in Figure 2. The system has two inputs: a plain text file containing the score in GABC and an audio file. The output is a table associating each Latin syllable (or note) with a time position. The alignment is done offline, as future audio information is used during the process.

2.1. GABC to MIDI conversion

The first step is to convert the score from GABC to MIDI. For this we use the open source tool *gabctk* [12]. This software parses the GABC file and assigns a time position and duration to each square note. By default, a tempo of 165 beats per minute (bpm) is used, and each note is given a duration of 1 beat. Specific musical notations that alter the duration of notes are also taken into account, such as *episeime* (note is sung slightly longer or with a slight emphasis, so is set to 1.7 beats), *quilisma* (adds a trill or vibrato effect, involving a prolongation of the previous note, which is set to 2 beats) and *punctum mora* (typically doubles the note it affects, but is set to 2.3 beats).

The Latin syllables are also extracted and inserted into the MIDI file as meta-events with the timing of their first note. Notice that a single syllable can be sung on one or more notes. An example of a GABC to MIDI conversion is illustrated in Figure 3.

2.2. Score representation

Given the score in MIDI format, a preprocessing stage is carried out to convert it into a suitable format for alignment. The score is represented as a sequence of *states*, where each state is a portion of the score delimited by adjacent onsets or offsets. Since plainchant is essentially monophonic, states often consist in a single note. Each state n is composed by

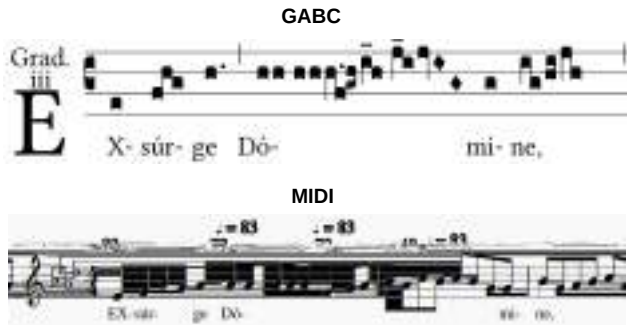


Figure 3. Conversion of a chant encoded in GABC to MIDI format using gabtk. Notes are given a duration of 1 beat at 165 bpm, with some markers changing the duration.

four parameters: start time, end time, Latin text syllable and a spectral pattern \mathbf{u}_n .

To compute the spectral patterns \mathbf{u}_n , the score is converted to a waveform using a synthesizer and then transformed to the time-frequency domain. All frames with the same combination of notes are stacked into a matrix, which is then reduced to a single pattern using a Non-negative Matrix Factorization (NMF) model with one basis vector. The process is repeated for all combinations present in the score. Note that different states are given the same spectral pattern if they have the same combination of notes.

To allow the alignment with DTW, the score is treated as a sequence of time frames $U = \{\mathbf{u}_{n(1)}, \dots, \mathbf{u}_{n(\tau)}, \dots, \mathbf{u}_{n(\Gamma)}\}$, where $\mathbf{u}_{n(\tau)}$ is the pattern corresponding to score frame τ and Γ is the number of score frames. Here, we denote the state associated to score frame τ as $n(\tau)$.

2.3. Cost matrix

The alignment module is responsible for determining the position of the score in the audio. Formally, the goal is to find the score time τ that corresponds to each audio time $t \in [1, T]$. For this task, the system computes a comparison measure between each incoming audio frame, denoted as \mathbf{v}_t in the frequency domain, and each element in U , and then estimates the best alignment path through the comparison matrix.

The cost measure $d(\tau, t)$ between \mathbf{v}_t and each position τ in the score is given by

$$d(\tau, t) = D_\beta(g_{\tau,t} \mathbf{u}_{n(\tau)}, \mathbf{v}_t), \quad (1)$$

where $D_\beta(\cdot, \cdot)$ is the β -divergence function, $\beta = 1.5$ and $g_{\tau,t}$ represents the gain of $\mathbf{u}_{n(\tau)}$ that minimizes its β -divergence to \mathbf{v}_t . This gain can be computed as:

$$g_{\tau,t} = \frac{\|\mathbf{v}_t \circ \mathbf{u}_{n(\tau)}^{(\beta-1)}\|_1}{\|\mathbf{u}_{n(\tau)}^\beta\|_1}. \quad (2)$$

The cost measure in Eq. 1 can be interpreted as the minimum β -divergence between \mathbf{v}_t and $\mathbf{u}_{n(\tau)}$ up to amplitude differences. It is inspired by the NMF model in [13], where only a single basis can be active at each frame.

2.4. Alignment

The alignment path through the matrix $d(\tau, t)$ is determined by an implementation of offline DTW. From $d(\tau, t)$, the DTW *accumulated cost matrix* D is computed using the following recursion:

$$D(\tau, t) = \min_{j,i} \left\{ \begin{array}{l} D(\tau - j, t - 1) + d(\tau, t)\omega_j \\ D(\tau - 1, t - i) + d(\tau, t)\omega_i \end{array} \right\}, \quad (3)$$

where j and i are the step length in each dimension, whose values are the integers in the range $j \in [1, J]$ and $i \in [1, I]$. J and I are the maximum allowed step lengths in the score and audio axes, respectively. Our system uses $I = J = 4$, which allows the audio tempo to be between 1/4 and 4 times the MIDI tempo. In reality, Gregorian chant follows a melodic-verbal rhythm, where syllable and note duration varies depending on context and importance within the word/phrase. In our experiments, however, we found this settings to be robust enough in practice. The weight ω_j represents the cost associated with step $(j, 1)$, and w_i is the cost of step $(1, i)$. We use $\omega_j = 1$ and $\omega_i = i$.

Accordingly, the best step $(j, 1)$ or $(1, i)$ for each cell (τ, t) is stored in a matrix P as follows:

$$P(\tau, t) = \arg \min_{j,i} \left\{ \begin{array}{l} D(\tau - j, t - 1) + d(\tau, t)\omega_j \\ D(\tau - 1, t - i) + d(\tau, t)\omega_i \end{array} \right\}. \quad (4)$$

The matrix P allows the alignment path to be constructed from the end of the audio, in a traceback stage. In ordinary DTW, the last pair of the alignment path is (τ_{min}, T) , where $\tau_{min} = \arg \min_\tau D(\tau, T)$, and then the path is retrieved backwards by indexing P . In our implementation, however, instead of using the whole audio, the alignment result for each frame t is backtracked from 40 seconds in the future. This allows us to limit memory usage even for very long audio without loss of accuracy, at the cost of a slight increase in CPU usage (the backtrack path is computed for each t). An efficient implementation of our DTW variant is described in [14]. Finally, from the alignment path, the score state (and hence the note and Latin syllable) corresponding to each audio time can be determined.

3. EXPERIMENTS AND DISCUSSION

We evaluated our method against five manually annotated chant recordings included in the Neumz application. These recordings are high quality performances by the nuns of the Abbey of Notre-Dame de Fidélité of Jouques. The sound is recorded live in the Abby, with some reverberation and ambient noise, sometimes accompanied by an organ. The five chants tested are, as named in neumz: *Quando natus est* (4 minutes), *Exsurge Domine fer opem* (3.5 minutes), *Urbs Jerusalem beata* (3 minutes), *Vocem jucunditatis* (4 minutes) and *Regem Confessorum Dominum* (7 minutes). The annotations consist of a list of verse lines, each associated with a point in the audio. As a result, we could only evaluate the alignment of the verses, even though our method operates at note level. We calculated the alignment accuracy as the percentage of verses that deviated less than a threshold (or tolerance window) from the reference alignment. The algorithm was run with the same signal analysis parameters as in [14].

The results of our evaluation are shown in Table 1. Tolerance windows of 0.5s and 1s were used. The maximum detected deviation is also shown in the last column.

Table 1. The per-verse accuracy of our score-to-audio alignment. Ground-truth was manually generated.

Chant	#Verses	Acc (0.5s)	Acc (1s)	Max dev.
Quando	30	90%	96.6%	1.8 s
Exsurge	8	75%	100%	0.9 s
Urbs	31	80.6%	100%	0.9 s
Vocem	13	70%	77%	1.7 s
Regem	43	65.1%	95.4%	1.2 s

The method yields results of sufficient quality to enable audio reproduction in sync with the musical score. To provide a more subjective evaluation, we generated a subtitle file with the synchronized Latin text, and it was observed that nearly all syllables were correctly aligned at first glance. Most errors occurred in unison segments where the same pitch was sustained over several syllables. Since our method is pitch-based, it is unable to detect individual syllables in such cases. The method seems to be resistant to background sounds and handles silent pauses between phrases well. Although plainchant scores do not specify precise tempo or note durations, the system was able to align the audio with good accuracy using our settings.

4. ACKNOWLEDGMENTS

We thank John Anderson from Neumz for providing the recordings/scores used in our experiments. This work was supported by the Regional Government of Andalucía under

the PAIDI 2020 Framework Programme through grant P18-TPJ-4864 and the REPERTORIUM project. Grant agreement number 101095065. Horizon Europe. Cluster II. Culture, Creativity and Inclusive society. Call HORIZON-CL2-2022-HERITAGE-01-02.

5. REFERENCES

- [1] H. Strayer, “From Neumes to Notes: The Evolution of Music Notation,” *Musical Offerings*, vol. 4, no. 1, pp. 1–14, 2013.
- [2] B. Cornelissen, W. Zuidema, and J.A. Burgoyne, “Studying large plainchant corpora using chant21,” in Proc. of the 7th International Conference on Digital Libraries for Musicology, (Montréal, Canada), pp. 40–44, 2020.
- [3] J. Stinson, “Medieval Music on the Web: Musical Resources for the 21st Century,” *Australian Academic & Research Libraries*, vol. 28, no. 1, pp. 65–74, 1997.
- [4] D. Lacoste, and J. Koláček, “Cantus index: Online catalog for mass and office chants,” URL: <http://cantusindex.org/>.
- [5] D. Lacoste, “The cantus database: Mining for medieval chant traditions,” *Digital Medievalist*, vol. 7, 2012.
- [6] O. Berten and contributors, “Gregobase: A database of gregorian scores,” URL: <https://gregobase.selapa.net/>.
- [7] Gregorio, “The Gregorio project,” URL: <http://gregorio-project.github.io/index.html>.
- [8] Neumz, URL: <https://neumz.com>.
- [9] T. de Reuse, and I. Fujinaga, “Robust transcript alignment on medieval chant manuscripts,” in Proc. of the 2nd Int. Workshop on Reading Music Systems, (Delft, The Netherlands), 2019.
- [10] A. Arzt, *Flexible and Robust Music Tracking*, Ph.D. dissertation, Johannes Kepler University Linz, 2016.
- [11] F. J. Rodríguez-Serrano, J. J. Carabias-Orti, P. Vera-Candeas, and D. Martínez-Munoz, “Tempo driven audio-to-score alignment using spectral decomposition and online dynamic time warping,” *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 1–20, 2016.
- [12] Gabctk, URL: <https://github.com/jperon/gabctk>.
- [13] J. J. Carabias-Orti, F. J. Rodríguez-Serrano, P. Vera-Candeas, F. J. Cañadas-Quesada, and N. Ruiz-Reyes, “Constrained non-negative sparse coding using learnt instrument templates for realtime music transcription,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 7, pp. 1671–1680, 2013.
- [14] P. Cabañas-Molero, R. Cortina-Parajón, E.F. Combarro, P. Alonso, and F.J. Bris-Peñalver, “HReMAS: Hybrid real-time musical alignment system,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 75, pp. 1001–1013, 2019.

QUANTUM SUPPORT VECTOR MACHINES IN CARDIAC SOUND ANALYSIS: EVALUATING PERFORMANCE WITH SIGNAL REPRESENTATION TECHNIQUES

Antonio J. Muñoz Montoro¹, Pablo Revuelta Sanz², Juan De La Torre Cruz³, Francisco J. Cañadas Quesada³, Jose Ranilla Pastor²

¹ Universidad de Málaga, Málaga, España

² Universidad de Oviedo, Gijón, España

³ Universidad de Jaén, Linares, España

RESUMEN

El análisis de los sonidos cardíacos desempeña un papel crucial en la detección y diagnóstico de enfermedades cardiovasculares. Con los avances en el procesamiento digital de señales y las técnicas de inteligencia artificial, la clasificación automática de estos sonidos se ha convertido en un campo de investigación activo. Este estudio aborda los desafíos y oportunidades de aplicar modelos de aprendizaje cuántico (QML) en el análisis de sonidos cardíacos reales. El objetivo de este trabajo es evaluar el rendimiento de las máquinas de soporte vectorial cuánticas (QSVM) utilizando diferentes técnicas de representación de señales como la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT), los coeficientes cepstrales de Mel-frecuencia (MFCC) y los cocleogramas. Los experimentos realizados, en los cuales se utilizan máquinas de soporte vectorial clásicas (SVM) como referencia, indican una clara viabilidad para incorporar técnicas cuánticas en el análisis y diagnóstico de enfermedades cardiovasculares, especialmente cuando hay pocos ejemplos y se utilizan un número reducido de características. Este hecho podría mejorar significativamente la precisión y eficacia de los métodos de detección utilizados en este contexto, donde generalmente hay datos limitados disponibles.

ABSTRACT

The analysis of cardiac sounds plays a crucial role in the detection and diagnosis of cardiovascular diseases. With advances in digital signal processing and artificial intelligence techniques, the automatic classification of these sounds has become an active field of research. This study addresses the challenges and opportunities of applying quantum machine learning (QML) models in the analysis of real cardiac sounds. The goal of this work is to evaluate the performance of quantum support vector machines (QSVM) using different signal representation techniques such as Short-Time Fourier Transform (STFT), Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), and cochleograms. The conducted experiments, where classical support vector

machines (SVM) are used as reference, indicate a clear feasibility to incorporate quantum techniques in the analysis and diagnosis of cardiovascular diseases, especially when there are few examples, and a reduced number of features are used. This fact could significantly improve the accuracy and effectiveness of the detection methods used in this context where, precisely, there is usually limited data available.

Palabras Clave— quantum machine learning, heart sound classification, quantum support vector machines, signal representation.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares imponen un impacto significativo en el sistema de salud a nivel mundial, con millones de muertes anuales y un sustancial impacto económico en los sistemas de atención médica. La detección temprana y el diagnóstico preciso de estas enfermedades son imperativos para lograr un tratamiento efectivo y prevenir complicaciones graves. En este contexto, el análisis de los sonidos cardíacos emerge como un recurso esencial, proporcionando información crucial sobre la función cardíaca y asistiendo a los profesionales médicos en la identificación de posibles anomalías que puedan requerir evaluación adicional.

Históricamente, el análisis de los sonidos cardíacos se ha basado en técnicas como la auscultación, en la que los médicos escuchan los sonidos producidos por el corazón utilizando un estetoscopio. Sin embargo, esta auscultación manual es subjetiva y depende en gran medida de la experiencia y la pericia del profesional, lo que puede dar lugar a variaciones en la interpretación. Además, puede ser un desafío detectar anomalías sutiles o clasificar con precisión los sonidos cardíacos basándose únicamente en señales auditivas percibidas.

Para superar estas limitaciones y mejorar la precisión y eficiencia en el análisis de los sonidos cardíacos, los

investigadores han recurrido a técnicas de procesamiento de señales digitales y aprendizaje automático. Entre estas técnicas, los coeficientes cepstrales de Mel-frecuencia (MFCCs) han ganado amplia aceptación. Estos coeficientes se emplean comúnmente en aplicaciones de reconocimiento de voz, análisis musical y otras disciplinas relacionadas con el procesamiento de audio. Los MFCCs permiten extraer características relevantes vinculadas con la distribución de frecuencias y la energía de los sonidos cardíacos, las cuales luego sirven como entradas para algoritmos de aprendizaje automático destinados a la clasificación de los sonidos cardíacos [1].

En este contexto, han surgido numerosos algoritmos de aprendizaje automático, como pueden ser las máquinas de soporte vectorial (SVM) [1], las redes neuronales (NN) [1] y los bosques aleatorios (RF) [2], mostrando resultados prometedores cuando se combinan con características basadas en MFCC para la clasificación de los sonidos cardíacos. Estos enfoques ofrecen soluciones no invasivas, rentables y automatizadas para la detección temprana de enfermedades cardiovasculares, lo que permite intervenciones oportunas que pueden mejorar los resultados para los pacientes y reducir los costos de atención médica.

A pesar de los avances en esta dirección, existe una laguna en la literatura científica en cuanto a la aplicación de técnicas de aprendizaje automático basadas en la computación cuántica para la clasificación de sonidos cardíacos. Esta falta de exploración en el ámbito de la computación cuántica plantea el interrogante fundamental de cuál sería la representación de señal óptima para lograr una clasificación precisa utilizando estos enfoques. Considerando que las representaciones de señal más comunes para sonidos cardíacos incluyen los MFCCs [8], la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT) [9] y los cocleogramas, surge la necesidad de abordar una investigación profunda y rigurosa para determinar cuál de estas representaciones resultaría más adecuada en el contexto de las técnicas cuánticas de aprendizaje automático.

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis exhaustivo y comparativo de las distintas representaciones de señal mencionadas, con el fin de determinar cuál de ellas ofrece los resultados más prometedores cuando se emplean en enfoques de aprendizaje automático basados en la computación cuántica. A través de esta investigación, aspiramos a arrojar luz sobre la idoneidad de las representaciones de señal en el contexto de la computación cuántica y contribuir así al avance de las técnicas de diagnóstico de enfermedades cardiovasculares.

2. APRENDIZAJE AUTOMÁTICO CUÁNTICO

El aprendizaje automático cuántico, conocido en inglés como quantum machine learning (QML), se presenta como un enfoque prometedor donde confluyen la computación cuántica y el aprendizaje automático, aprovechando los principios de la mecánica cuántica para desarrollar métodos más potentes y eficientes en el procesamiento y análisis de datos [3]. Mediante la explotación de los fenómenos cuánticos, el QML abre la posibilidad de enriquecer las capacidades de los algoritmos tradicionales de aprendizaje automático.

Uno de los modelos cuánticos destacados en este campo es la máquina de soporte vectorial cuántica (QSVM) [4]. La QSVM aprovecha la dimensionalidad exponencial del espacio de Hilbert para calcular núcleos cuánticos de manera eficiente, lo que potencia la separación de datos. Al hacer uso de algoritmos cuánticos, las QSVM tienen el potencial de alcanzar un rendimiento de clasificación superior en comparación con sus contrapartes clásicas. La elección de mapas de características desempeña un papel crucial en la determinación de la eficacia de las QSVM. A través de la selección cuidadosa de mapas de características y la optimización de hiperparámetros, los investigadores pueden aprovechar el potencial de las QSVM en el análisis de sonidos cardíacos.

En el marco de este estudio, hemos adoptado las QSVM para explorar su aplicabilidad en el campo del análisis de sonidos cardíacos. Mediante el empleo de las QSVM, buscamos proporcionar una vía para aprovechar las ventajas de los núcleos cuánticos en la precisa clasificación de sonidos cardíacos. Para la implementación y evaluación de estos modelos, hemos hecho uso de PennyLane, una versátil biblioteca de aprendizaje automático cuántico que nos ha permitido simular cálculos cuánticos en hardware clásico [5].

Con la incursión de modelos de QML en el análisis de sonidos cardíacos se persigue aprovechar las innatas fortalezas de la computación cuántica para mejorar la detección y el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares. Al incorporar algoritmos cuánticos en el proceso de análisis de sonidos cardíacos, anticipamos un incremento en la precisión, un mejor rendimiento en la clasificación, y el potencial para descubrir nuevas perspectivas a partir de los datos. Nuestro estudio sienta las bases para futuras investigaciones en este campo emergente, allanando el camino hacia nuevos avances en la aplicación del QML para abordar retos complejos en la salud cardiovascular.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando una variante de la "Base de Datos de Sonidos Cardíacos Yaseen" (YHSD) [6], que contiene grabaciones de alta calidad de sonidos cardíacos adquiridos de pacientes con diversas afecciones cardíacas. Esta base de datos se divide en dos conjuntos distintos: uno normal y otro anormal. El conjunto anormal comprende cuatro categorías: estenosis aórtica, estenosis mitral, regurgitación mitral y prolapso de la válvula mitral. Cada categoría consta de 200 archivos de audio, lo que suma un total de 1.000 archivos de audio en la base de datos. Las grabaciones se llevaron a cabo meticulosamente y se capturaron utilizando estetoscopios electrónicos, garantizando así su precisión y fiabilidad. YHSD forma parte de un conjunto de bases de datos de acceso público en constante crecimiento, creadas con el propósito de facilitar la investigación y los avances en el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares mediante el empleo de técnicas de procesamiento de señales y aprendizaje automático. Este conjunto de datos sirvió como fundamento para evaluar el rendimiento del modelo propuesto, permitiendo así medir su eficacia en la clasificación de sonidos cardíacos y su potencial impacto en la mejora de los resultados en el ámbito de la salud cardiovascular.

En el contexto de este estudio, abordaremos dos enfoques distintos de clasificación en el análisis de sonidos cardíacos. En primera instancia, nos enfocaremos en una clasificación binaria con el objetivo de detectar la presencia de anomalías cardíacas en los pacientes. Este enfoque implica la diferenciación entre sonidos cardíacos normales y anormales. En segunda instancia, emprenderemos una clasificación multiclase, donde se buscará categorizar los sonidos anormales clasificados en las cuatro categorías anteriormente descritas.

Para evaluar la eficacia de la propuesta en este estudio, se empleó la métrica de precisión, la cual se define como la proporción de resultados correctamente clasificados sobre el total de predicciones realizadas por el modelo. En otras palabras, la precisión mide la capacidad del modelo para clasificar de manera correcta y certera los sonidos cardíacos como normales o anormales, o en el caso de la clasificación multiclase, dentro de las categorías específicas de anomalías cardíacas. Esta métrica es fundamental en la evaluación de la exactitud de los modelos de aprendizaje automático, ya que proporciona una medida cuantitativa de su capacidad para realizar predicciones precisas.

Para lograr la selección óptima de los parámetros relacionados con las diferentes representaciones de señal, llevamos a cabo un exhaustivo estudio experimental. Inicialmente, variamos el número de puntos de la transformada y el grado de solapamiento de tramas de la

STFT. Como resultado de este análisis, identificamos que los mejores resultados se obtuvieron al utilizar 256 puntos en la transformada, junto con un solapamiento del 70% para la clasificación binaria y un solapamiento del 20% para la clasificación multiclase. Estos valores óptimos se aplicaron posteriormente en el cálculo de las demás representaciones de señal, asegurando así una comparación justa y equitativa. En el caso de MFCC, tras un detenido análisis de sus diversos parámetros, determinamos que el conjunto óptimo consiste en un banco de filtros compuesto por 100 filtros y la selección exclusiva de los primeros 10 coeficientes MFCC. De manera similar, en el caso de los cocleogramas, se optó por seleccionar 10 coeficientes para garantizar la coherencia de las representaciones de señal utilizadas en este estudio. Además, es importante destacar que se emplearon ventanas de longitud 30 ms y que la frecuencia de muestreo fue 8 kHz.

En lo que respecta al tamaño de los conjuntos de entrenamiento y prueba, destinamos el 20% del conjunto total de ejemplos para la fase de prueba. Sin embargo, debido a restricciones en la capacidad de cómputo cuántico que pudimos simular de manera clásica, nos vimos limitados a utilizar apenas 200 ejemplos para el proceso de entrenamiento. Para el entrenamiento del modelo basado QSVM, se implementó una sintonización de hiperparámetros mediante un enfoque de validación cruzada ($k=5$). Esta sintonización de hiperparámetros se centró en la selección del núcleo cuántico óptimo a partir de una variedad de mapas de características, entre los cuales se incluyen el mapa de características ZZ, la incrustación de ángulos y la incrustación de amplitud (véase [7]).

Tabla 1. Resultados obtenidos por el modelo QSVM para el conjunto de datos YHSD, incluyendo diferentes representaciones de señal.

Representación	Precisión	
STFT	87,6	51,9
MFCC	95,5	60,7
Cocleograma	84,2	26,3
	<i>Binaria</i>	<i>Multiclase</i>

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos por el modelo basado en QSVM para el conjunto de datos descrito. Se puede observar una diferencia notable en términos de precisión entre la clasificación binaria y multiclase. Esto se debe en gran medida a la naturaleza del problema, donde la clasificación binaria, al distinguir entre sonidos cardíacos normales y anormales, tiende a ser más sencilla en comparación con la clasificación multiclase, que aborda la categorización específica de anomalías cardíacas. En ambos casos, se destacan los resultados obtenidos al utilizar los MFCC como representación de señal, alcanzando un nivel de precisión del 95% en la clasificación binaria y del 60% en la clasificación multiclase. Estos resultados sugieren que los

MFCC tienen la capacidad de sintetizar eficazmente la información espectral en sus primeros 10 coeficientes, lo que facilita una clasificación precisa. Por otro lado, se observa que los cocleogramas muestran un rendimiento inferior en comparación con los MFCC, lo que podría atribuirse a su capacidad limitada para capturar características relevantes de los sonidos cardíacos. En cuanto a la STFT, no logra superar a los MFCC, posiblemente debido a que los sonidos cardíacos se suelen encontrar en frecuencias bajas, y la inclusión de contenido espectral de alta frecuencia podría estar limitando la capacidad del modelo para la clasificación.

4. CONCLUSIÓN

En este estudio, se abordó el desafío de la clasificación de sonidos cardíacos mediante el empleo de técnicas basadas en QML, explorando la idoneidad de distintas representaciones de señal en este contexto. Se evaluaron tres representaciones de señal ampliamente utilizadas: la STFT, los MFCC y los cocleogramas. Los resultados obtenidos arrojaron luz sobre la eficacia de estas representaciones en el marco de la QML y su capacidad para mejorar la detección y el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares a través del análisis de sonidos cardíacos. Se observó que, en general, los MFCC destacaron como la representación de señal más efectiva. Este rendimiento sugiere que los MFCC tienen la capacidad de sintetizar de manera efectiva la información espectral relevante en los sonidos cardíacos, lo que facilita una clasificación precisa.

Este estudio allana el camino para futuras investigaciones en el campo emergente del aprendizaje automático cuántico aplicado al análisis de sonidos cardíacos. Los resultados prometedores obtenidos al emplear MFCC en modelos QSVM sugieren la posibilidad de mejorar significativamente la detección y el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares mediante la integración de técnicas cuánticas. Además, se destaca la importancia de seleccionar cuidadosamente la representación de señal adecuada al utilizar métodos de QML, ya que esta elección puede tener un impacto sustancial en el rendimiento del modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente respaldado por la subvención PID2020-119082RB financiada por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033, la subvención AYUD/2021/50994 financiada por el Gobierno del Principado de Asturias (España) y el proyecto QUANTUM SPAIN financiado por el Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital del Gobierno de España y la Unión Europea a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia - NextGenerationEU. También queremos expresar nuestro agradecimiento al CTIC de Asturias por

proporcionarnos la infraestructura necesaria para llevar a cabo este trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] G. Y. Son and S. Kwon. "Classification of heart sound signal using multiple features", *Applied Sciences*, vol. 8, no 12, pp. 2344, 2018.
- [2] M. Nassralla, Z. El Zein, and H. Hajj, "Classification of normal and abnormal heart sounds," in Proc. of the Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (Beirut, Lebanon), pp. 1-4, 2017.
- [3] J. Biamonte, P. Wittek, N. Pancotti, P. Rebentrost, N. Wiebe, and S. Lloyd, "Quantum machine learning", *Nature*, vol. 549, no 7671, pp. 195-202, 2017.
- [4] V. Havlíček, A.D. Córcoles, K. Temme, A.W. Harrow, A. Kandala, J.M. Chow, and J.M. Gambetta, "Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces", *Nature*, vol. 567, no 7747, pp. 209-212, 2019.
- [5] V. Bergholm, J. Izaac, M. Schuld, C. Gogolin, S. Ahmed, V. Ajith, and N. Killoran, "Pennylane: Automatic differentiation of hybrid quantum-classical computations", *arXiv preprint arXiv:1811.04968*, 2018.
- [6] Yaseen Heart Sound Database Portal, (<https://github.com/yaseen21khan/Classification-of-Heart-Sound-Signal-Using-Multiple-Features->).
- [7] E. F. Combarro and S. González-Castillo, "A Practical Guide to Quantum Machine Learning and Quantum Optimization", *Packt*, 2023.
- [8] D. M. Nogueira, C. A. Ferreira, and A. M. Jorge, "Classifying Heart Sounds Using Images of MFCC and Temporal Features", in Proc. 18th EPIA Conference on Artificial Intelligence, (Porto, Portugal), pp. 186-203, 2017.
- [9] S. M. Debbal y F. Bereksi-Reguig, "Time-Frequency Analysis of the First and the Second Heartbeat Sounds", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 184, no. 2, pp. 1041-1052, 2007.

MODELADO DE RESPUESTAS AL IMPULSO DE SALAS MEDIANTE REDES NEURONALES PROFUNDAS

Gonzalo Atienza Selva ^{1*}, Fran Pastor Naranjo ¹, Valery Naranjo Ornedo ¹, Gema Piñero Sipán ²

¹ I3B, Universitat Politècnica de València, España

² ITEAM, Universitat Politècnica de València, España

RESUMEN

En este trabajo se describe un sistema para inferir respuestas al impulso acústicas (*room impulse responses*, RIR) entre dos ubicaciones específicas dentro de la misma sala. Dicho sistema está basado en redes neuronales profundas en las que la entrada es una RIR medida en la sala. La novedad de este modelo es que la entrada es directamente la respuesta al impulso en el dominio del tiempo. En general, los métodos para el modelado de RIRs que utilizan redes neuronales se han basado en la imagen obtenida por la *short-time Fourier transform* (STFT), o bien en la imagen espacial obtenida mediante la propagación del campo sonoro (*soundfield*). Ambas presentan varias limitaciones principalmente debido a la dificultad en reconstruir la fase. En este trabajo se proponen e implementan diferentes arquitecturas de redes neuronales profundas y se compara su rendimiento. Entre otras, el estudio de *autoencoders* basados en redes neuronales recurrentes, las cuales son adecuadas para procesar secuencias de datos, como el audio, ya que pueden capturar la dependencia temporal de los datos.

ABSTRACT

This paper describes a system for inferring room impulse responses (RIR) between two specific locations within the same room. Such a system is based on deep neural networks where the input is a measured RIR in the room. The novelty of this model is that the input is directly the impulse response in the time domain. In general, the modelling of RIRs using neural networks has been based on the image obtained by the Short Time Fourier Transform (STFT) or on the spatial image obtained by the sound field propagation. Both have several limitations, mainly due to the difficulty in reconstructing the phase. In this work, different deep neural network architectures are proposed and implemented, and their performance is compared. Among others, autoencoders based on recurrent neural networks are studied, which are suitable for processing sequences of data, such as audio, since they can capture the temporal dependence of the data.

Palabras Clave— Estimación de *room impulse response* (RIR), redes neuronales recurrentes (RNN), sistemas multicanal.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo de las comunicaciones audiovisuales está experimentando una serie de cambios significativos, entre los que se distinguen dos campos: uno el visual, el cual se está llevando gran parte de la

atención de los investigadores, y el campo auditivo, que no recibe esa misma dedicación por parte de los mismos, a pesar de ser igual de importante que la parte visual para la experiencia de los usuarios que gozan de estos servicios. Es por esto, que nace la necesidad de investigar y desarrollar aplicaciones de audio capaces de generar una experiencia inmersiva e incorporarlas, por ejemplo, en videojuegos o realidad virtual. Para ello se proponen sistemas de reproducción de sonido inteligentes mediante el uso de múltiples altavoces, conocidos como sistemas multicanal.

Mientras las aplicaciones de procesamiento de audio se han desarrollado teniendo en cuenta plataformas de alto rendimiento computacional para sistemas multicanal, el paradigma del *Internet of Things* (IoT) demanda el uso de aplicaciones más flexibles y eficientes energéticamente. Por ello, a partir de esta demanda de sistemas flexibles y eficientes surge el propósito de implementar Zonas Personales de Sonido mediante el uso de técnicas de *machine learning*.

Las Zonas Personales de Sonido [1] consisten en crear zonas de sonido personalizado en un espacio compartido, como por ejemplo una habitación. El propósito principal es brindar a cada individuo una experiencia auditiva única en un mismo espacio, minimizando las interferencias. Esto permite que cada persona pueda escuchar diferentes sonidos de manera independiente sin afectar a los demás, dándole la información completa al oyente sobre la fuente de audio y su entorno acústico. Esto es gracias al avance del procesamiento digital de señales que se ha conseguido que el entorno acústico pueda ser descrito mediante la denominada respuesta al impulso de la sala (RIR, *Room Impulse Response*), que puede ser modelada por un filtro de respuesta finita [2]. Para que este sistema funcione se requiere una RIR específica entre el altavoz y el punto de la sala donde esté el oyente. Sin embargo, si queremos que el oyente pueda tener libertad para desplazarse por la sala y seguir escuchando el sonido, será necesario introducir una nueva RIR que nuevamente represente la respuesta entre el altavoz y la nueva posición del oyente. Estas RIRs hay que medirlas, y si aspiramos a que estos sistemas puedan ser usados en cualquier sala, medir todas las RIRs no es una opción válida. Es por eso que en este trabajo se propone el uso de técnicas de *deep learning* (DL) para predecir las nuevas RIRs.

La mayoría de los trabajos previos que intentan predecir una RIR mediante DL se basan en la reconstrucción de la magnitud y fase de la STFT o bien en la reconstrucción del *soundfield* (Ver [3] y las referencias incluidas). El mayor reto es la reconstrucción de la fase,

* **Autor de contacto:** gonatsel@cam.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

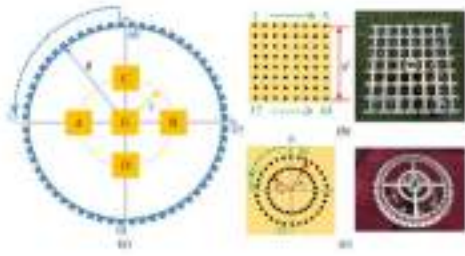


Figura 1. Representación de la disposición de altavoces y micrófonos en la base de datos

por lo que en este trabajo se ha optado por considerar la RIR en el dominio del tiempo.

2.BASE DE DATOS

Para realizar los experimentos se ha empleado una base de datos que contiene un subconjunto de mediciones de RIR realizadas en diversas salas [4]. Los creadores de la base de datos colocaron un conjunto de 60 altavoces dispuestos de manera uniforme en una estructura circular con un radio de $R=1.5$ m en seis habitaciones distintas. Además, se posicionaron dos arrays de micrófonos: uno en forma de matriz cuadrada de 8×8 con 64 micrófonos y otro en forma de matriz circular de doble capa con 60 micrófonos, en cinco zonas distintas dentro de la disposición de altavoces. Entre estas cinco zonas, los centros de las Zonas A, B, C y D se colocaron a lo largo de un círculo con un radio de $r=0.4$ m, mientras que la Zona E se ubicó en el centro de la disposición de altavoces, tal y como se muestra en la Figura 1 (a). El primer array de 64 micrófonos constaba de una matriz cuadrada de 8×8 con una dimensión de 28 cm, es decir, la separación de los micrófonos es de 4 cm, y se muestra en la Figura 1 (b). El segundo array de 60 micrófonos presentaba una disposición circular de doble capa, donde 30 micrófonos se distribuyen de manera uniforme a lo largo de los círculos exterior e interior con radios de $r_1=12$ cm y $r_2=10$ cm respectivamente, y se muestra en la Figura 1 (c).

La base de datos incluye un total de 260,400 RIRs de las cuales 134,400 provienen del array cuadrado y 126,000 del array circular. Cada RIR tiene una longitud de 43480 muestras, lo que equivale a aproximadamente 1 segundo, con una frecuencia de muestreo de 48 kHz. Para los siguientes experimentos se ha decidido usar las RIRs de la sala pequeña, tanto por sus dimensiones como por tiempo de reverberación $T60=0.5$ seg.

3.MARCO TEÓRICO

En este apartado se explica la base teórica del *deep learning* necesaria para entender el funcionamiento del trabajo realizado.

A. Red Neuronal Simple

Una red neuronal es una arquitectura que trata de imitar el funcionamiento de una neurona del cerebro humano, y está compuesta por n entradas, las cuales representan las características de nuestros datos de entrada.

Para cada neurona en particular el funcionamiento es idéntico, se multiplica el valor de todas las conexiones de entrada a la neurona

x_i por los pesos w_i y se suman todos los valores obtenidos. Los pesos son los parámetros de la red que representan la intensidad de la conexión entre neuronas [5]. A la suma ponderada se le aplica una función de activación, la cual es importante para introducir no linealidades y permitir que la red capture patrones y relaciones complejas entre los datos. Las funciones de activación más comunes son la sigmoide, que trabaja en un rango entre 0 y 1; la ReLU que es lineal respecto los valores positivos mientras anula los negativos; la tangente hiperbólica que tiene un rango entre -1 y 1; y también están otras más recientes como la ELU o la PReLU.

Una de las redes más simples es el perceptrón multicapa, en la cual las neuronas básicas se organizan en capas. Una red neuronal tiene siempre una capa de entrada, que representa las características, una o más capas intermedias u ocultas, y la capa de salida que representa la predicción. Las capas más comunes de una red neuronal son las capas densas o capas totalmente conectadas[6]. Estas implican que cada neurona en esta capa está interconectada con todas las neuronas de la capa anterior por los pesos, los cuales tienen que ser calculados mediante el entrenamiento para conseguir la salida óptima para todos los datos de entrenamiento.

B. Forward Backward Propagation

El entrenamiento se divide en dos pasos que se hacen iterativamente durante este proceso.

Primero el *forward-propagation*, que toma los datos de entrada y los propaga por la red hasta la salida, es decir, calcula el resultado de cada neurona utilizando los coeficientes que en ese momento están calculados.

Acto seguido el *backward-propagation*, que tras el cálculo del error entre la salida y el *ground-truth* (el verdadero valor de la salida) y mediante un algoritmo de optimización se ajustan los pesos de la red desde la capa de salida hasta la capa de entrada tratando de alcanzar el mínimo error posible a la salida de la red.

C. Red Neuronal Recurrente.

Las redes neuronales recurrentes (*Recurrent Neural Network*, RNN) [7] constituyen una arquitectura de redes neuronales diseñada especialmente para identificar patrones en secuencias de datos. Se aplican ampliamente en tareas como el modelado de lenguaje, la generación de texto y el reconocimiento de voz, entre otras.

Lo que diferencia a las Redes Neuronales Recurrentes de los perceptrones multicapa es la manera en que transmiten información a través de la red. Mientras que los perceptrones multicapa llevan a cabo la propagación sin ciclos, las RNN incorporan ciclos, permitiendo que la información fluya hacia atrás en la secuencia.

Esto les permite tener en cuenta también las entradas anteriores x_{t-1} y no solo la entrada actual x_t , como se puede observar en la Figura 2.

Sin embargo, las RNN tradicionales tienen limitaciones en su capacidad para manejar y aprender relaciones a largo plazo en secuencias debido al problema conocido como desvanecimiento de gradientes (*vanishing gradient problem*) y explosión de gradientes (*exploding gradient problem*). Estos problemas ocurren cuando se intenta entrenar redes neuronales profundas, donde los gradientes

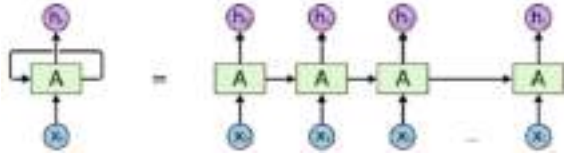


Figura 2. Red neuronal recurrente. Un fragmento de la red neuronal, A, examina una entrada x_t y produce un valor h_t . Un bucle permite que la información se transmita de un paso de la red al siguiente. Imagen obtenida en [8].

que se propagan a través de las capas se vuelven muy pequeños o grandes, lo que dificulta o incluso impide el entrenamiento efectivo de la red.

Aquí es donde entra en juego la arquitectura de *Long Short-Term Memory* (LSTM) [8], representada en la Figura 3, que fue diseñada para mitigar estos problemas y permitir que las redes neuronales recurrentes capturen relaciones a largo plazo en secuencias. Las LSTM son un tipo de RNN que incorporan unidades de memoria especializadas para retener y olvidar información en diferentes puntos de una secuencia. Tienen tres puertas principales: la puerta de entrada, la puerta de olvido y la puerta de salida, que controlan cómo la información fluye dentro de la unidad de memoria.

La clave de la LSTM es el estado de celda, la línea horizontal que atraviesa la parte superior del diagrama. La LSTM tiene la capacidad de eliminar o agregar información al estado de celda.

Para ello utilizamos una puerta de salida O_t para leer las entradas de la celda, una puerta de entrada I_t para introducir datos en la celda y una puerta de olvido F_t para restablecer el contenido de la celda. El primer paso en nuestra LSTM es decidir qué información vamos a descartar del estado de la celda y qué nueva información vamos a almacenar en el estado de la celda. Las siguientes ecuaciones ilustran el funcionamiento de la red:

$$f_t = \sigma(w_f[h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad f_t \in [0,1] \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(w_i[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad i_t \in [0,1] \quad (2)$$

$$\underline{c}_t = \tanh(w_c[h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad \underline{c}_t \in [-1,1] \quad (3)$$

Donde w_f , w_i y w_c son los pesos que se entrenan, b_f , b_i y b_c son las constantes bias, σ y \tanh son las funciones de activación sigmoide y tangente hiperbólica. Luego de obtener la celda de memoria candidata \underline{c}_t y la compuerta de olvido F_t , actualizamos el nuevo estado de la celda C_t .

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \underline{c}_t \quad (4)$$

Finalmente, se decide qué partes específicas del estado de la celda serán producidas como salida, siendo w_o y b_o los pesos y el bias de la puerta de salida.

$$o_t = \sigma(w_o[h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad o_t \in [0,1] \quad (5)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad \underline{c}_t \in [-1,1] \quad (6)$$

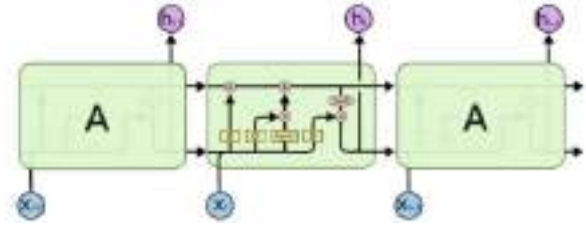


Figura 3. Long Short-Term Memory. Imagen obtenida en [8].

4. METODOLOGÍA

Hasta ahora, en otros trabajos similares para estimar o predecir respuestas al impulso en salas, se ha trabajado en el dominio frecuencial, en concreto utilizando la *Short-Time Fourier Transform* (STFT). Estos trabajos han dado buenos resultados prediciendo la magnitud de la STFT, pero no tanto a la hora de predecir su fase [9]. Es por eso que en este trabajo se explora la capacidad de las redes neuronales para estimar la RIR en el dominio del tiempo.

En esta sección, investigamos diversas estructuras de aprendizaje profundo con el propósito de descubrir un modelo con la capacidad de replicar una RIR determinada entre dos puntos de la sala. Comenzamos con enfoques simples y progresivamente aumentamos la complejidad. Para lograr esto, experimentamos con múltiples modelos en los cuales la salida buscada o *ground-truth* es la RIR inferida. Después, continuamos avanzando en el desarrollo utilizando el modelo que obtenga el menor error.

A. Autoencoder Fully-connected

El primer modelo que exploramos es el *autoencoder fully-connected* [10] que es una estructura que posibilita obtener una representación compacta de los datos de entrada en el espacio latente reduciendo la dimensionalidad de la RIR mediante capas densas. Se observa en la Figura 4.

El objetivo es que el *autoencoder* comprima la información relevante en la representación latente y luego la utilice para reconstruir los datos de entrada. Un *autoencoder* consta de tres partes principales:

- El codificador o *encoder* tiene el objetivo de reducir la dimensión de los datos de manera que la información relevante se conserve en la representación latente. El codificador consiste en capas de neuronas que aplican transformaciones lineales y funciones de activación para capturar patrones y características importantes en los datos de entrada.
- El espacio latente de un *autoencoder* es una representación de dimensionalidad reducida de los datos de entrada que se aprende durante el proceso de entrenamiento del *autoencoder*. Es el espacio donde se codifica la información más importante de los datos originales en una forma más compacta.
- El decodificador o *decoder* toma la representación latente generada por el codificador y la utiliza para reconstruir los datos originales. Al igual que el *encoder*, el *decoder* consiste en capas de neuronas que aplican transformaciones para generar una versión reconstruida de los datos. El objetivo es que la reconstrucción sea lo más fiel posible a los datos de entrada.

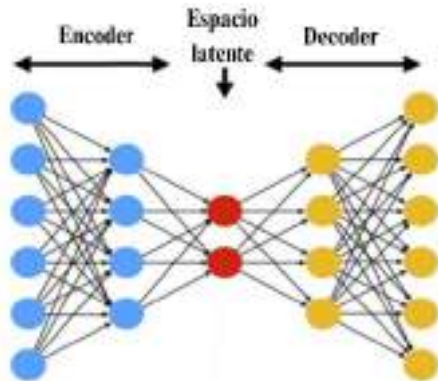


Figura 4. Autoencoder Fully-connected.

En un autoencoder el número de entradas y salidas corresponde con el tamaño de la RIR que se pretende reconstruir, es decir, el número de muestras de la RIR.

B. Autoencoder LSTM

El siguiente modelo es una modificación del *autoencoder fully-connected* del apartado anterior en el que se le aplica mayor complejidad añadiendo capas LSTM en el *encoder-decoder*. Las LSTM son de mucha utilidad para mapear secuencias de datos, como las RIR, ya que posibilita la capacidad de captar las dependencias temporales de la señal.

El modelo que se propone es una variante del modelo AE-FC (*autoencoder fully-connected*) que incorpora capas LSTM. A través de varias pruebas y experimentación, como se puede ver en la Figura 5, se ha determinado que la ubicación más efectiva para insertar estas capas LSTM es en el cuello de botella del modelo. En el diseño de la arquitectura se ha seguido un enfoque que comienza con una serie de capas densamente conectadas que conforman el *autoencoder*. Estas capas son responsables de la codificación y decodificación de los datos de entrada. En este punto, se puede introducir una o varias capas LSTM, que actúan como una extensión de la representación codificada. Ubicar las capas LSTM en el cuello de botella permite al modelo comprimir los datos de entrada en una representación compacta y contextualizada, en la que se capturan tanto las características importantes como las relaciones temporales.

C. Dual-Path Recurrent Neural Network

El *Dual-Path recurrent neural network* (DPRNN) es una arquitectura diseñada para modelar largas secuencias de audio en el dominio del tiempo mediante redes neuronales recurrentes (RNN). Debido a que las RNN muestran limitaciones en la representación de secuencias especialmente largas, en el artículo [11] se propone el DPRNN como solución basada en la reorganización de las capas RNN mediante dos RNN locales y globales. El modelo DPRNN se destaca por su simplicidad y baja parametrización, a pesar de superar el rendimiento del estado del arte en la tarea de separación de fuentes de audio mono, siendo este el objetivo del artículo original y la razón por la que la arquitectura DPRNN fue diseñada, y ha demostrado ser altamente eficaz en este contexto, superando las limitaciones de las RNN estándar. La arquitectura se muestra en la Figura 6 y consta de tres fases: segmentación, procesamiento de bloques y reconstrucción de la señal resultante mediante *overlap-add*:

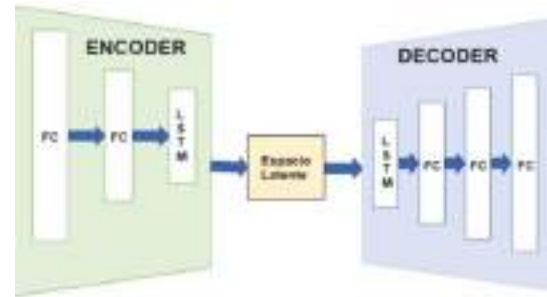


Figura 5. Autoencoder LSTM.

1. Segmentación

En el proceso de segmentación, se avanza a través de una RIR compuesta por L muestras, extrayendo gradualmente segmentos S de K muestras mediante un desplazamiento P siendo $P < K$. La uniformidad en la longitud de los segmentos es crucial, por lo que, si el último segmento contiene menos de K muestras, es posible completarlo con ceros al principio o al final de la secuencia completa de la RIR. En esta situación, para evitar la necesidad de agregar ceros, se ha optado por emplear un desplazamiento P y un número de K muestras por segmento que sea múltiplo de dos. Al tener una RIR con un número de muestras múltiplo de dos, se garantiza que todos los segmentos tengan una longitud uniforme.

La inclusión de un desplazamiento P en el proceso de segmentación resulta fundamental, ya que este aspecto contribuye significativamente a que las redes neuronales recurrentes del *Dual-PathRNN* capturen de forma más precisa las dependencias temporales presentes en la RIR, además de que ofrece la ventaja de ampliar el contexto tanto en la dirección pasada como en la futura de las secuencias temporales, enriqueciendo así la información disponible para el modelo.

2. Procesamiento de bloques

El DPRNN se compone de una etapa de procesamiento en bloques, donde cada bloque DPRNN se descompone en dos bloques adicionales para cada RNN. En el primer bloque, se emplea una LSTM bidireccional intra para el procesamiento de información local, mientras que el segundo bloque presenta una LSTM bidireccional inter, destinada a la elaboración de información global.

El bloque intra se encarga de modelar la secuencia de audio en un contexto local, procesando los datos de forma independiente. En contraste, los bloques inter se centran en extraer información de todos los segmentos para ejecutar un procesamiento global. Esto permite capturar relaciones de largo alcance y patrones de la secuencia completa, en lugar de solo considerar información local en cada segmento. Esto se logra transponiendo la salida del bloque intra antes de introducirlo al bloque inter.

3. Overlap-add

La fase final del DPRNN implica el uso del *overlap-add*, una técnica empleada en el procesamiento de señales que combina fragmentos superpuestos de señales, normalmente en el dominio temporal, para obtener la señal resultante.

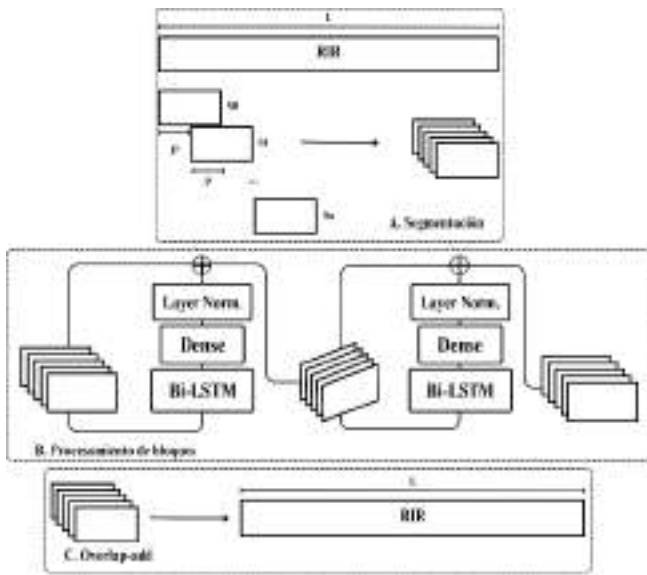


Figura 6. Esquema de las fases del DPRNN

En resumen, al igual que los autoencoders, el objetivo es que el modelo reconstruya la RIR introducida. Para ello, se introduce una RIR segmentada al modelo y mediante el procesamiento de bloques el modelo devuelve la RIR segmentada, la cual se reconstruye en la fase de overlap-add.

5. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por las distintas redes neuronales profundas del apartado anterior a la hora de tratar de recrear la RIR inferida.

Las métricas utilizadas para el cálculo de los resultados es la función de pérdidas *mean square error* (MSE) en los datos de validación. Los datos de validación se utilizan para evaluar el rendimiento de un modelo en un conjunto de datos independiente que no se ha utilizado durante el entrenamiento. El MSE se define como:

$$MSE = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

Donde y_i es la RIR *ground-truth* e \hat{y}_i es la RIR inferida, siendo i el índice de la muestra temporal. En la tabla 1 se muestra el MSE obtenido para las distintas redes neuronales. Se puede ver como el DPRNN es el modelo que mejor se comporta reconstruyendo una RIR inferida.

Modelos	MSE
AE-FC	0.0146915
AE-LSTM	0.0026876
DPRNN	2.0139009e-06

Tabla 1. Resultados en la reconstrucción de la RIR inferida.

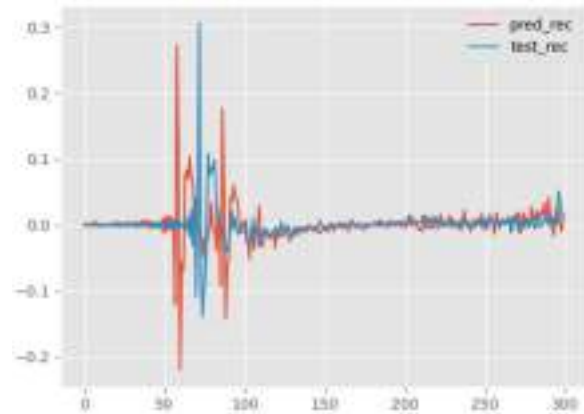


Figura 7. Comparación directa entre el *ground-truth* y la RIR predicha (solo las 300 primeras muestras). En azul el *ground-truth* y en rojo la RIR obtenida.

El DPRNN es el modelo que mejores resultados nos ha dado a la hora de modelar la RIR que introducimos y hemos decidido partir de esta arquitectura para predecir una RIR completamente nueva.

Por ello la propuesta que se plantea consiste en inferir dos RIR diferentes a partir de una misma matriz de RIRs, con el objetivo de predecir la RIR intermedia. En otras palabras, se emplearán dos RIR distintas como entradas del modelo, mientras que la RIR interpolada se considera la salida deseada. El objetivo es evitar que el modelo aprenda directamente de las salidas al introducir las RIRs que se desean predecir durante el proceso de entrenamiento.

El siguiente paso en el proceso consiste en inferir las dos RIRs de entrada utilizando dos bloques independientes de la arquitectura *Dual-Path Recurrent Neural Network*. Cada bloque DPRNN opera con una de las RIRs de entrada como su propia entrada y busca predecir la RIR intermedia correspondiente. Esto significa que cada bloque DPRNN se especializa en capturar patrones y características específicas de una RIR de entrada.

Una vez que ambas RIRs de entrada han pasado por sus respectivos bloques DPRNN y se han obtenido las predicciones de las RIRs intermedias, estas predicciones se combinan en un proceso de fusión. La fusión de las predicciones de las RIRs intermedias se realiza con el propósito de obtener una RIR final interpolada.

Los resultados de la Tabla 2 muestran cómo se comporta el modelo a la hora de inferir dos RIRs y combinarlas. Podemos ver que las pérdidas no son tan bajas, pero se alejan de la prueba anterior. No obstante, en la Figura 7 se observa un problema en la RIR predicha, y es que parece no ser capaz de decidir cuál de las dos RIRs tiene más peso que la otra.

Modelo	MSE
Double-DPRNN	5.9405043e-05

Tabla 2. Resultados de inferir dos RIR y predecir la RIR intermedia.

Al observar los resultados, queda claro que el modelo sigue siendo eficaz para capturar toda la información de las RIR inferidas, pero tiene dificultades al interpolar ambas RIR. Aunque existen técnicas de interpolación de RIRs, es importante destacar que estas son

computacionalmente más complejas en comparación con las técnicas de aprendizaje profundo. Recordar que esta es una de las razones por las cuales se optó por implementar soluciones basadas en redes neuronales profundas.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han establecido los fundamentos para un nuevo estudio sobre metodologías de modelado y análisis de RIRs en el dominio del tiempo. La línea de investigación se mantiene abierta, y en el futuro se pretende seguir trabajando en el modelo DPRNN. Hay ideas como implementar mecanismos de atención [12], redes convolucionales unidimensionales [13] o ideas como acortar aún más las RIR.

ACKNOWLEDGEMENT

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, “ERDF A way of making Europe” a través del proyecto PID2021-124280OB-C21 y por PROGRAMA PROMETEO 2023-CIPROM/2022/20.

7. REFERENCIAS

- [1] T. Betlehem et al. “Personal Sound Zones: Delivering interface-free audio to multiple listeners”, *IEEE Signal Proc. Magazine*, 32(2), 81–91, 2015.
- [2] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Sixth Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [3] Fernandez-Grande, E., Verburg, S. A., Karakonstantis, X. “Sound field reconstruction: towards large-scale spatial sensing.” 10th Conv. of the European Acoustics Assoc., Torino, Italy, 2023.
- [4] Zhao, S., Zhu, Q., Cheng, E., & Burnett, I. S. “A room impulse response database for multizone sound field reproduction”. *The Journal of the Acoust. Soc. of America*, 152(4), 2505–2512, 2022.
- [5] Dasaradh S. K., “A Gentle Introduction to Math Behind Neural Networks” (2020)
- [6] Yugesh Verma, “A Complete Understanding of Dense Layers in Neural Networks”, 2021.
- [7] Schmidt, R. M. “Recurrent neural networks (RNNs): A gentle introduction and overview”, 2019
- [8] Christopher Olah. <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>
- [9] I. Martin et al., “Predicting Room Impulse Responses Through Encoder-Decoder Convolutional Neural Networks”, 34th MLSP Conference, Rome, Italy, 2023.
- [10] M. Sotaquirá, “Autoencoders: explicación y tutorial en Python” (2019)
- [11] Luo, Y., Chen, Z., & Yoshioka, T., “Dual-Path RNN: Efficient Long Sequence Modeling for Time-Domain Single-Channel Speech Separation.” *ICASSP*, 46–50, 2020.
- [12] Subakan, C et al., “Attention Is All You Need In Speech Separation.” *ICASSP*, 21–25, 2021.
- [13] Q. Tao, F. Liu, Y. Li and D. Sidorov, “Air Pollution Forecasting Using a Deep Learning Model Based on 1D Convnets and Bidirectional GRU,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 76690-76698, 2019.

RECONOCIMIENTO DE EMOCIONES A TRAVÉS DE LA SEÑAL DE VOZ

Lorena Álvarez Pérez¹, Álvaro Callejas Ramos¹
Fernando Blanco Albendea²

¹Universidad Carlos III de Madrid, Leganés (Madrid), España

²Accenture Limited

RESUMEN

El reconocimiento de emociones es una herramienta muy atractiva debido al gran número de aplicaciones y casos de uso que ofrece. La utilización de algoritmos de aprendizaje automático supervisado permite a la máquina “aprender” a partir de las características de la voz humana, para posteriormente predecir la emoción del hablante en señales de audio desconocidas. En este trabajo se presentan dos sistemas de reconocimiento de emociones: uno para voz hablada (8 emociones) y otro para voz cantada (6 emociones). Asimismo, se incluye un estudio previo de las características de la voz humana y de los clasificadores (de aprendizaje máquina) utilizados, que mejor rendimiento presentan en la tarea de reconocimiento de emociones. Se han llevado a cabo experimentos utilizando la base de datos RADVESS (del inglés “*The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song*”) que contiene 7356 ficheros que corresponden a 24 actores (12 hombres y 12 mujeres) y se han considerado 4 clasificadores: perceptrón multicapa, Random Forest, XGBoost y el algoritmo k -NN. Se comprobará que, dependiendo del tipo de problema a resolver, será mejor un clasificador u otro, y la emoción peor clasificada también dependerá de si la señal de audio es voz hablada o voz cantada.

ABSTRACT

Speech emotion recognition refers to the process of predicting human emotions from audio signals using machine learning algorithms. It has become more prominent due to its large number of applications in areas such as, for instance, psychology, medicine, education and entertainment. Extracting relevant features from audio signals is a crucial task in this process aiming at correctly identifying emotions. In this paper, we proposed two automatic emotion recognizer systems: 1) it works for spoken speech (in this case, the speech recordings consist of 8 emotions) and 2) it works for song (in this case, the recording consist of 6 emotions). There are several databases for speech emotions testing. In this paper, we refer to the Ryerson Audio Visual Database of Emotional Speech and Song (RADVESS) because of its diversity and length. It comprises 7356 files and contains 24 professional actors (12 female, 12 male), vocalizing two lexically matched statements in a neutral North American

accent. The following 4 classifiers have been the objects for the research: Multilayer Perceptron, Random Forest, XGBoost and the k -nearest neighbours algorithm. It will be shown that the classifier that best works will depend on the kind of the problem to be solved. In the same line of reasoning, the worst classified emotion will also depend on whether the audio signal is speech or song.

Palabras Clave— aprendizaje máquina, reconocimiento de emociones a través de la voz, clasificación por tramas y clasificación por pistas.

1. INTRODUCCIÓN

Las emociones son estados afectivos que todo ser humano experimenta de forma constante. Las emociones surgen cuando tiene lugar un suceso relevante, pero la relevancia de cada acontecimiento es subjetiva y no es posible predecir con exactitud lo que siente una persona en concreto simplemente por el estímulo que haya provocado ese acontecimiento. Por ejemplo, si una persona está viendo la televisión y escucha un golpe, su reacción y las emociones desencadenadas dependerán de cómo reciba el estímulo, del grado de interés por lo que estuviera viendo en ese instante en la pantalla, y de muchos otros factores, en su mayoría desconocidos a simple vista.

En los últimos años, las nuevas tecnologías y su interactividad en la vida del ser humano han pasado a formar parte de la normalidad. La aparición de nuevos algoritmos, aplicaciones y herramientas que buscan facilitar el día a día de las personas crece de manera exponencial [1]. La investigación sobre el reconocimiento de emociones continúa avanzando y es necesario mantener este progreso, no sólo para el desarrollo de aplicaciones de uso diario, sino también para expandir su empleo a otras facetas y profesiones, como, por ejemplo, la investigación de accidentes, la lucha contra el terrorismo, la educación, la medicina o la neurociencia. La demanda de sistemas de detección de emociones efectivos continúa creciendo a medida que avanzan la investigación en procesos emocionales y el estudio de la neurociencia afectiva, y según aumenta el número de aplicaciones que facilitan la vida de las personas tanto en el ámbito personal o de ocio, como en el ámbito profesional en algunos casos. Una solución para hacer frente a la creciente demanda y a los

avances científicos es el desarrollo de un sistema de reconocimiento de la voz [2].

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de dos sistemas de reconocimiento automático de emociones a través de la señal de voz. Cada sistema recoge la voz del hablante, analiza su estado emocional, y devuelve un parámetro de salida que refleja o indica su emoción. Esta predicción debe ser independiente del significado, el sentido y signos lingüísticos como símbolos, palabras o expresiones que utilice el hablante. El primer sistema utiliza señales de voz cantada, mientras que el segundo utilizará voz hablada. Este diseño requiere un estudio previo de las características de la voz humana y el sonido, y un análisis de los algoritmos y clasificadores de aprendizaje automático que permitan el reconocimiento de emociones a través de las características obtenidas.

El resto de este trabajo se divide tal y como se indica a continuación. La Sección 2 incluye un breve estado del arte en el que se detallan los fundamentos teóricos relativos a las emociones, el modelo de producción de voz y sus características, así como una descripción concisa del término o concepto: aprendizaje máquina. La Sección 3 describe el sistema de reconocimiento de emociones implementado en este trabajo, incluyendo una descripción de la base de datos, el procesado de la señal de voz, así como las características y clasificadores implementados. La Sección 4 resume los resultados obtenidos, y finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones extraídas, así como las futuras líneas de trabajo que quedan abiertas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

La señal de voz es el principal medio de comunicación entre los seres humanos, y se considera que contiene una gran cantidad de información sobre el estado emocional del emisor [3]. Sin embargo, la investigación sobre el reconocimiento de emociones ha estado principalmente centrada en el reconocimiento facial debido a las dificultades técnicas que implica un archivo de audio.

Las investigaciones actuales relacionadas con el reconocimiento de emociones se basan en los algoritmos de aprendizaje automático utilizados, las características de audio extraídas y el desarrollo de bases de datos orientadas al reconocimiento de emociones. Por lo tanto, la investigación sobre el reconocimiento automático de emociones en términos generales ya sea facial o a través de la voz, no engloba únicamente el campo del aprendizaje automático, sino también los ámbitos psicológico, lingüístico y biológico. En el terreno psicológico, las emociones son síndromes generados a raíz de diferentes tipos de eventos; en el campo de la lingüística, estas son cambios en la frecuencia fundamental, espectro, duración e intensidad de la voz; y por

último, en el campo de la biología, son configuraciones del organismo en las cuales múltiples sistemas internos siguen un patrón que va evolucionando para hacer frente a una situación particular de forma eficiente. De este modo, para poder progresar en el desarrollo de estas aplicaciones, es necesario avanzar en los campos de investigación mencionados [4].

2.2. Fundamentos de las emociones

Se ha considerado que las emociones de los seres humanos han ido cambiando a lo largo de la evolución de la especie. No obstante, la realidad es que las emociones no son características por sí mismas, y surgen como combinaciones de algunas de ellas. Esto hace de la investigación una tarea muy subjetiva, y por este motivo, los investigadores trabajan con emociones características para poder diferenciar unas de otras.

Muchos investigadores están de acuerdo en que las emociones y su interpretación pueden estar condicionados por los fenómenos sociales, expectativas, normas y el entorno en el que vive cada persona. Diferentes sociedades tratan de forma distinta algunas emociones como el amor, la ira o la vergüenza.

En 1972, el psicólogo estadounidense Paul Ekman, se opuso a este planteamiento, y una gran parte de la comunidad científica, hoy en día, sigue cuestionando la validez de sus hallazgos. Ekman descubrió que existen 6 expresiones básicas y universales: alegría, asco, enfado, miedo, sorpresa y tristeza. En la década de los 90, Ekman incluyó una lista de emociones secundarias que surgen a raíz de la combinación de dos o más emociones básicas, y que no siempre se identifican con una expresión facial. Esta lista de emociones se muestra en la Tabla 1 [5] y son las más utilizadas en experimentos de reconocimiento de emociones.

Tabla 1. Lista de emociones primarias y secundarias según Paul Ekman.

Emociones primarias	Emociones secundarias
Alegría, asco, enfado, miedo, sorpresa y tristeza	Alivio, bochorno, culpa, desprecio, diversión, emoción, orgullo, satisfacción y vergüenza

2.3. Producción de la voz y el habla

La voz es el sonido producido por cualquier especie cuando el aire es expulsado por los pulmones a través de la laringe y hace que vibren las cuerdas vocales. Surgió a raíz de la necesidad de comunicarse del ser humano, y su uso no se limita a la transmisión de mensajes orales, sino que transmite el estado emocional de una persona a través de sus características, independientes del contenido del mensaje.

Sin embargo, el habla no es solamente la emisión del sonido, e incluye su modificación mediante los órganos resonadores y la emisión de las palabras mediante los órganos articuladores. Por un lado, los órganos resonadores son la faringe, la cavidad bucal y las fosas nasales, cavidades en las que el sonido que sale a través de la laringe resuena y se amplifica. Por otro lado, los articuladores son los órganos encargados de convertir el sonido en fonemas. Estos son los labios, los dientes y la lengua [6].

A continuación, se expone el modelo de producción de la voz humana, desde que el aire sale de los pulmones hasta que este sale por los labios, en función del tipo de sonido emitido. Los sonidos emitidos por el ser humano pueden ser tonales, si estos son producidos por la oscilación relajada de las cuerdas vocales, como las vocales y varias consonantes, o no tonales, si durante su emisión las cuerdas vocales permanecen abiertas y el aire expulsado a cierta velocidad produce una turbulencia. En la producción de sonidos tonales, el flujo de aire saliente de los pulmones incrementa la presión y las cuerdas vocales se separan, permitiendo que el aire fluya. Este flujo de aire disminuye la presión, permitiendo que las cuerdas vocales se vuelvan a cerrar.

2.4. Fundamentos del aprendizaje automático

La Inteligencia Artificial (IA) es el término más genérico para hacer referencia al campo de la informática centrado en la creación de programas capaces de mostrar comportamientos considerados “inteligentes”. Fue acuñado en el año 1956 por el informático John McCarthy, que la definió como “*la ciencia y el ingenio de hacer máquinas inteligentes*”, en la conferencia de Dartmouth [7]. Engloba numerosas técnicas, como algoritmos de búsqueda, estadística, análisis predictivo o el aprendizaje automático (también conocido como *machine learning*, de su nombre en inglés).

El aprendizaje automático, concretamente, es una práctica que consiste en el uso de algoritmos para analizar datos, aprender de ellos y utilizarlos para hacer una predicción o estimación sobre algo externo. A su vez, el aprendizaje automático engloba el aprendizaje profundo, que consiste en utilizar algoritmos para “imitar” el funcionamiento del cerebro humano en el procesado de datos y en su uso para la generación de patrones y toma de decisiones.

Desde el año 2010 hasta la actualidad, los “gigantes informáticos” han desarrollado sus propias herramientas de aprendizaje automático. Algunos ejemplos son Google y la Universidad de Stanford con “GoogleBrain”, IBM con “Watson” o Microsoft con “Kinect” [8].

3. SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE EMOCIONES

3.1. Base de datos

La base de datos utilizada para el diseño de los diferentes clasificadores de emociones, y la investigación llevada a cabo en este trabajo, es la denominada “Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song” (RAVDESS) [9]. Este conjunto de datos se puede descargar de forma gratuita y contiene un total de 7356 registros, cada uno de los cuales, ha sido sometido a 10 evaluaciones en tres aspectos: intensidad, autenticidad y validez emocional.

Los datos utilizados son pistas de audio de duración 3-5 segundos, interpretadas por 24 actores (12 hombres y 12 mujeres) de Toronto (Canadá), que vocalizan dos oraciones diferentes, pero cuyo léxico está emparejado, en un inglés con acento norteamericano neutro para no afectar a los experimentos. El rango de edad de los actores es 21-36 años, siendo la media, 26 años. El formato de las muestras es audiovisual, pero por el alcance del trabajo, únicamente se utiliza el audio.

Las oraciones son: “*Kids are talking by the door*” / “*Dogs are sitting by the door*”. Ambas oraciones tienen 7 sílabas y están emparejadas en cuanto a frecuencia y familiaridad. Cada actor tiene un total de 44 pistas de audio cantado reflejando 6 emociones distintas y 60 pistas de audio hablado, siendo 8 el número de emociones reflejado en este caso. Las emociones analizadas son: neutro, calma, alegría, tristeza, enfado, miedo, disgusto y sorpresa. Estas dos últimas emociones sólo se grabaron en formato hablado, por lo que la clasificación de emociones en las dos modalidades se realiza por separado.

Cada uno de los actores tiene pistas expresando cada emoción con dos intensidades distintas: normal y fuerte. Por cada emoción, actor y modalidad (cantada o hablada), son 4 pistas con intensidad normal y otras 4 pistas con intensidad fuerte, exceptuando la emoción neutra, para la cual no hay nivel de intensidad fuerte y, por tanto, sólo incluye 4 pistas por actor. Cabe que no se distinguirá intensidad de emociones durante las clasificaciones.

Con esto en mente, a continuación, se resume el número de pistas para cada modalidad explorada en este trabajo:

- Voz hablada: 1440 pistas
- Voz cantada: 1012 pistas

La frecuencia de muestreo es 16 kHz y se utilizan 16 bits para la codificación. Como se ha comentado, las pistas de audio tienen una duración de 3-5 segundos, de los cuales, aproximadamente los primeros y últimos 0,5 segundos son silencio. Estos valores son ruido y se eliminan antes de proceder a la extracción de características, ya que no aportan información al clasificador y reducen la precisión de este.

3.2. Extracción de características

A continuación, se describe cómo se transforma la señal de audio (ya sea voz hablada o voz cantada) en una serie de variables o características que representa la información del

sonido y que se utilizan como entrada al clasificador (en lugar de la señal de audio).

3.2.1. MFCCs

Los MFCCs (de su nombre en inglés, *Mel Frequency Cepstral Coefficients*) [10] son un tipo de coeficientes cepstrales utilizados por músicos y productores para modelar audio y música. Durante un largo tiempo, ha sido la característica más utilizada para el reconocimiento de voz debido a su habilidad para representar el espectro de amplitud de la voz de forma compacta. Estos coeficientes derivan de la aplicación del Cepstrum sobre una ventana de tiempo de la señal de voz. El Cepstrum es un operado que, transformando una convolución temporal en una suma en el dominio espectral, consigue extraer la excitación y el tracto vocal de la señal.

Para el cálculo de los coeficientes de Mel, se siguen los siguientes pasos:

- Pre-énfasis: la señal de audio se pasa por un filtro de pre-énfasis para compensar la atenuación de -20 dB/década que produce el mecanismo humano para la producción del habla.
- Enventanado: la señal de voz es un proceso aleatorio y no estacionario, lo que supone un inconveniente para su análisis. Si se tiene en cuenta que es estacionaria a muy corto plazo (\sim ms), es posible obtener segmentos muy cortos en el tiempo y solapados entre sí, que sí son estacionarios. En este trabajo, se utiliza una ventana de tipo Hanning con una duración de 20 ms, y un solapamiento entre ventanas de 10 ms. De este modo, se obtienen coeficientes cada 10 ms.
- Cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT). A partir de este momento, se trabaja sólo con la amplitud del espectro y se descarta la fase.
- Banco de filtros de Mel. La señal se multiplica por un banco de filtros triangulares de área unidad, espaciados según las frecuencias de la escala Mel. En este trabajo se han utilizado 40 filtros. Tras multiplicar el módulo de la DFT por el banco de filtros Mel, se calcula la energía correspondiente en cada uno de los filtros.
- Logaritmo de la señal transformada. Se calcula el logaritmo de la energía.
- Cálculo de la Transformada Discreta del Coseno.

3.2.2. Δ MFCCs

Asimismo, se han calculado los coeficientes Delta-MFCC (o Δ MFCCs), conocidos como coeficientes de velocidad. Estos coeficientes contienen información sobre las trayectorias de los MFCCs con respecto al tiempo.

Es conveniente utilizar estas características junto con los MFCCs porque las señales de voz varían en el tiempo y son un flujo constante. Aunque en la lingüística, se describa la

voz como una “concatenación de secuencia de fonemas”, una descripción más precisa es una “secuencia de transiciones entre fonemas”. Estos nuevos coeficientes no son muy precisos, ya que las derivadas tienden a amplificar el ruido blanco y la salida es más ruidosa, pero son muy fáciles de calcular y ofrecen un claro beneficio al concatenarse con los MFCCs instantáneos [11].

3.2.2. Frecuencia fundamental

La frecuencia fundamental (o también conocida como “pitch”) es una característica interesante por ser una de las percepciones básicas del sonido y una variable con mucha información emocional. Dicha frecuencia es la más baja del espectro de frecuencias, y las frecuencias dominantes pueden expresarse como múltiplos de esta.

Esta característica se obtiene a partir de las tramas obtenidas tras el enventanado del proceso de extracción de los MFCCs. Posteriormente se calcula la DFT, seguida de una interpolación cuadrática de la magnitud espectral. Esta es una herramienta muy potente para estimar la frecuencia instantánea cerca de un pico en el espectro. Consiste en aproximar la forma de un espectro cerca de un pico mediante una parábola. Si bien es cierto que en este caso se utiliza una ventana de Hanning, esta aproximación está justificada para cualquier tipo de ventana [12].

3.3. Clasificadores

A continuación, se expone cada uno de los clasificadores utilizados para los experimentos, así como sus parámetros más importantes.

3.2.1. Perceptrón Multicapa (MLP)

El MLP [13] es un tipo de red neuronal artificial utilizado, mayormente, para clasificación, que combina neuronas artificiales en una capa de entrada, una o más capas ocultas, y una capa de salida. La dimensión de la capa de entrada es igual al número de características del conjunto de datos, la dimensión de la capa de salida es igual al número de etiquetas o clases, y las neuronas de capas contiguas se conectan entre sí para conformar la red neuronal.

En los experimentos llevados a cabo en este trabajo, se han utilizados MLP con una única capa oculta, cuyo número de neuronas se ha obtenido por validación cruzada.

3.2.2. Random Forest (RF)

RF es un clasificador muy útil para problemas multiclase por su alta capacidad de generalización. Se trata de una combinación de árboles predictores, cada uno de los cuales depende de un vector aleatorio con la misma distribución [14].

En el clasificador utilizado en este trabajo, los árboles predictores utilizan la impureza de Gini para evaluar la calidad de la división. Asimismo, se han ajustado el valor de 2 hiperparámetros, utilizando validación cruzada, con objeto

de reducir el coste computacional y evitar el sobreajuste del modelo. El primero es la profundidad máxima de cada árbol y el segundo es el número de árboles o estimadores, ya que utilizar más árboles de lo necesario no implica una mejor eficiencia del clasificador.

3.2.3. XGBoost

XGBoost (de su nombre en inglés, “*eXtreme Gradient Boosting*”) [15] es uno de los algoritmos dominantes en el campo del aprendizaje automático. Se sitúa entre los clasificadores de “aprendizaje conjunto”, al igual que RF, ya que utiliza múltiples modelos generados y combinados estratégicamente con el objetivo de resolver un problema concreto, obteniendo un mejor rendimiento predictivo que el que se podría obtener utilizando cualquiera de los modelos por separado.

En este tipo de clasificadores, se van añadiendo secuencialmente nuevos árboles predictores para corregir los errores cometidos por los árboles ya existentes hasta que no haya más mejoras que hacer. De forma muy sencilla, se puede decir que, en la secuencia de creación de árboles, en el instante t , se asigna un peso menor a las salidas de las muestras clasificadas correctamente en la iteración $t - 1$, y se asignan pesos mayores a las salidas erróneas.

Los parámetros principales que ajustar son la profundidad máxima de los árboles y el número de árboles que forman el conjunto. En ambos casos, los valores óptimos se han obtenido a través de validación cruzada. Otro parámetro que afecta al rendimiento del modelo es la tasa de aprendizaje η , que indica la medida utilizada para reducir los pesos después de cada iteración en el proceso de *boosting*. En los experimentos llevados a cabo, se ha comprobado empíricamente que $\eta = 0,3$ es el valor que mejor resultados proporciona.

3.2.4. k -NN

El clasificador k -NN (del inglés, *k-Nearest Neighbours*) [16] es uno de los clasificadores más sencillos e intuitivos y se aplica en una gran variedad de ámbitos. En este caso, cada muestra del conjunto de test se clasifica según la clase a la que pertenezcan las k muestras más cercanas a esta y, por lo tanto, las muestras del conjunto de entrenamiento se utilizan directamente en la fase de test.

En este caso, se ha ajustado el valor del hiperparámetro k que representa el número de vecinos e influye en el rendimiento del modelo.

3.4. Sistema de clasificación de emociones

La Figura 2 muestra un diagrama del sistema de reconocimiento de emociones desarrollado en este trabajo, desde la pista de audio original hasta la clasificación de la emoción correspondiente a dicha pista o a cada una de las tramas que la forman, según el tipo de clasificación.

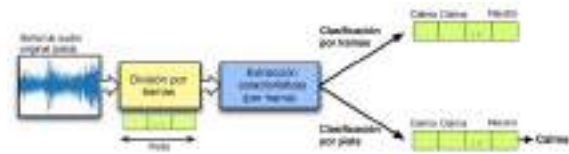


Figura 2. Diagrama del sistema de reconocimiento de emociones.

4. RESULTADOS

Para las pistas de voz cantada, se han realizado dos tipos de clasificación: por tramas y por pistas. Sin embargo, para el conjunto de pistas de voz hablada, únicamente se ha llevado a cabo una clasificación por pistas debido al alto coste computacional, teniendo en cuenta que son un total de 1440 pistas (442513 tramas).

4.1. Experimentos con voz cantada

4.1.1. Clasificación por tramas

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos utilizando únicamente los MFCCs y Δ MFCCs. Como se puede observar, el clasificador con mayor precisión es XGBoost.

Tabla 2. Clasificación por tramas para voz cantada.

Clasificador	Tasa de error (%)
MLP	33,4 \pm 2,0
RF	33,9 \pm 1,0
XGBoost	31,7 \pm 1,0
k-NN	40

4.1.2. Clasificación por pistas

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos utilizando únicamente los MFCCs y Δ MFCCs. En este caso, el clasificador con mayor precisión es el MLP. Es común que la clasificación por pistas aporte mejores resultados que la clasificación por tramas, ya que en este caso un error en la clasificación de una trama perteneciente a una pista correctamente clasificada no se tiene en cuenta, y no aumenta por tanto la probabilidad de error.

Tabla 3. Clasificación por pistas para voz cantada.

Clasificador	Tasa de error (%)
MLP	19,8 \pm 3,0
RF	34,95 \pm 2,58
XGBoost	26,43 \pm 2,96
k-NN	31,53

4.2. Experimentos con voz hablada

La Tabla 4 recoge los resultados obtenidos para voz cantada. En este caso, el clasificador con mayor precisión es el MLP, pero la tasa de error aumenta considerablemente respecto a los experimentos con voz cantada. Esto se debe principalmente al aumento de emociones en las clases.

Tabla 4. Clasificación por pistas para voz hablada

Clasificador	Tasa de error (%)
MLP	30,2 ± 4,08
RF	44,86 ± 3,12
XGBoost	35,17 ± 1,20
k-NN	36,77

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

En este trabajo se han diseñado dos sistemas de reconocimiento automático de emociones a través de la voz. Ambos sistemas utilizan la base de datos RADVESS.

Las características extraídas han sido los 13 primeros MFCCs y sus correspondientes coeficientes de velocidad o Δ MFCCs, además de la frecuencia fundamental. Se ha explorado el uso de cuatro clasificadores: MLP, RF, XGBoost y el algoritmo k -NN. Para todos ellos, se han ajustado sus hiperparámetros más importantes a través de validación cruzada.

El primer sistema es un clasificador para voz cantada en el que se distinguen 6 emociones. Se ha llevado a cabo dos tipos de clasificación: por tramas y por pistas. Los resultados obtenidos han demostrado que es mejor una clasificación por pistas, siendo el clasificador XGBoost el que mejor resultados proporciona.

El segundo sistema es un clasificador para voz hablada en el que se distinguen 8 emociones. En este caso, el clasificador que mejor resultados proporciona es el MLP.

Analizando las matrices de confusión de los resultados en ambos sistemas, se ha observado que la emoción peor clasificada es la emoción neutra, por su similitud con calma y tristeza.

Finalmente, se indican las posibles futuras líneas de investigación:

- Técnicas de aprendizaje profundo
- Sistemas de clasificación para voz cantada y hablada
- Sistema de clasificación jerárquico

6. REFERENCIAS

[1] M. Jalife. “Exponencial crecimiento de patentes de inteligencia artificial”. En *El Financiero* (febrero de 2019). Último acceso: septiembre de 2023. URL: <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/mauricio-jalife/exponencial-crecimiento-de-patentes-de-inteligencia-artificial/>

[2] J. Lope, and M. Graña, “An ongoing review of speech emotion recognition”, *Neurocomputing*, vol. 528, no. 1, pp. 1-11, 2023.

[3] N. Morán, J. Pérez, and W. Rodríguez, “Reconocimiento de Estados Emocionales de Personas Mediante la Voz Utilizando Algoritmo de Aprendizaje de Máquina”, *Revista Venezolana de Computación*, vol. 5, pp. 41-51, 2018.

[4] R. Cowie, E. Douglas-Cowie, N. Tsapatsoulis, G. Votsis S. Kollias, W. Fellenez, and J. G. Taylor, “Emotion-recognition in human-computer interaction”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 18, no.1, pp. 32-80, 2001.

[5] P. Ekman, and H. Oster, “Expresiones faciales de la emoción”, *Annual Review of Psychology*, vol. 30, pp. 527-554, 1979.

[6] R. Dosal González. “Producción de la voz y el habla. La fonación”. Trabajo Fin de Grado (pp. 3-4). Universidad de Cantabria, 2013. URL:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5583/DosalGonzalezR.pdf>

[7] J. Moor, “The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference: The Next Fifty Years”, *AI Magazine*, vol. 27, pp. 87-91, 2006.

[8] M. Velázquez, “Historia y evolución del Machine Learning”. En *RecluiT, atracción de talento*. Último acceso: septiembre de 2023. URL:

<https://recluit.com/historia-y-evolucion-del-machine-learning/>

[9] R. S. Livingstone, and F. A. Russo, “The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RADVESS) [Data set]. En *PLoS ONE (1.0.0)*, vol. 13, no. 5, p. e0196391. Zenodo. 2018.

[10] B. Logan, “Mel Frequency Cepstral Coefficients for Music Modeling”, in Proc. 1st Int. Symposium Music Information Retrieval (Plymouth, Massachusetts), 2000.

[11] T. Bäckström, “Introduction to Speech Processing. Deltas and Delta-deltas”. En *Aalto University Wiki* (2019). Último acceso: agosto de 2023. URL:

<https://wiki.aalto.fi/display/ITSP/Deltas+and+Delta-deltas>

[12] P. Magron, R. Badeau, and D. Bertrand, “Phase recovery by unwrapping: applications to music signal processing”, 2016.

[13] F. Murtagh, “Multilayer perceptrons for classification and regression”, *Neurocomputing*, vol. 2, no. 5-6, pp. 183-197, 1991.

[14] L. Breiman, “Random Forests”, *Machine Learning*, vol. 45, pp. 111-132, 2001.

[15] T. Chen, and C. Guestrin, “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”. En *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (New York, USA), pp. 785-794, 2016.

[16] P. Cunningham, and S. Delany, “k-Nearest neighbour classifiers”, *Mult Classif System*, vol. 54, 2007.



CLASIFICACIÓN DE SONIDOS EN EL EXTERIOR DE VEHÍCULOS MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Lucas Banchemo Martínez^{1*}
José Javier López Monfort¹

¹Universidad Politécnica de Valencia - ITEAM - GTAC, Valencia, España

RESUMEN

En este estudio, se utiliza la capacidad de las redes neuronales para comprender, caracterizar y clasificar distintos patrones de sonidos existentes en el entorno de un vehículo en funcionamiento. Para este cometido, se llevan a cabo mediciones acústicas en diferentes puntos del exterior del vehículo cuando éste está en marcha. Una vez obtenidas las medidas, se extraen los descriptores necesarios para llevar a cabo dicho entrenamiento del modelo de inteligencia artificial.

Como descriptor principal, se hace uso de los Espectrogramas de Mel. Este descriptor es elegido porque permite mantener la información en tiempo y en frecuencia de los audios (y por tanto, la información secuencial), y por otro lado, gracias a la naturaleza de los filtros de Mel, se puede obtener más resolución de la señal en baja frecuencia, donde se centra la información relevante.

Una vez entrenado el sistema con los descriptores elegidos, se procede a usar el modelo en la actuación del algoritmo de clasificación. Dicho algoritmo permite que, a raíz de segmentar una señal de audio en tramos, y posteriormente extraer su espectrograma, se pueda obtener la información acústica que predomina en dicho segmento, clasificarla con una clase concreta y poder actuar en consecuencia.

ABSTRACT

In this study, the capacity of neural networks is harnessed to comprehend, characterize, and classify various sound patterns present in the environment of a functioning vehicle. To accomplish this task, acoustic measurements are conducted at different points on the exterior of the vehicle while it is in operation. Once the measurements are obtained, the necessary descriptors are extracted for training the artificial intelligence model.

The primary descriptor utilized in this context is Mel Spectrograms. This choice is made because it enables the preservation of temporal and frequency information in the audio data (and, consequently, sequential information). Additionally, due to the nature of Mel filters, it provides higher signal resolution in the lower frequency range, where relevant information is concentrated.

Upon training the system with the selected descriptors, the model is employed in the classification algorithm's performance. This algorithm, when applied to audio signal segments and subsequent extraction of their spectrograms, allows for the identification of predominant acoustic characteristics in the segment, classification into specific categories, and subsequent actions accordingly.

Palabras Clave— ast, srp-phat, clasificación de audio, doa, inteligencia artificial

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad vial y el desarrollo de sistemas de conducción autónoma han sido temas centrales en la industria automotriz y la investigación tecnológica en los últimos años. Uno de los desafíos clave en este contexto es la detección temprana y precisa de eventos sonoros relevantes en el entorno del vehículo. La identificación de estos eventos es fundamental para mejorar la seguridad vial y permitir una conducción autónoma más segura y eficiente.

Sin embargo, en ciertas circunstancias, la disponibilidad de información visual puede ser limitada o insuficiente. Factores como la niebla, la lluvia intensa o simplemente la distancia con el objetivo pueden dificultar la comprensión completa de nuestro entorno a través de la vista. Es precisamente en estas situaciones cuando el sonido se convierte en una fuente valiosa de información, capaz de

* **Autor de contacto:** lbanmar@upv.edu.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

proporcionar detalles cruciales que escapan a la percepción visual en esos momentos.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema que hace uso de la inteligencia artificial (IA) y técnicas avanzadas de procesamiento de señales acústicas para detectar y localizar eventos sonoros relacionados con la conducción automovilística, en concreto bocinas y sirenas. El objetivo principal de este sistema es proporcionar información crítica en situaciones en las que la información visual puede resultar incompleta o insuficiente, mejorando así la seguridad vial y facilitando una conducción autónoma más segura y eficaz. A lo largo de este trabajo, se describirán con detalle los descriptores utilizados, la arquitectura de la IA, el algoritmo de estimación de dirección de llegada (DOA) y los resultados de los experimentos prácticos que respaldan la eficacia de esta aproximación.

2. DESCRIPTORES DE AUDIO

En este estudio, los espectrogramas de Mel han sido seleccionados como descriptores principales en base a su tratamiento logarítmico en frecuencia a lo largo de todo el espectro audible. Esta característica es resultado de la naturaleza de los filtros utilizados en la transformación de Mel y se revela como un atributo valioso para el análisis de entornos automovilísticos, concretamente, en sonidos de bocinas y sirenas, siendo los objetos de este estudio.

Como se puede apreciar en el Figura 1 y la Figura 2, las principales componentes frecuenciales de los sonidos a analizar tienen su energía concentrada entre 500Hz y 4000Hz. Dado que el ruido de rodadura automovilística se centra en 500 Hz–2.5 kHz, como se demuestra en estudio anteriores [1][2], la mayor resolución en estas bandas resulta un elemento crítico a la hora de discernir entre ruidos y señales de interés.

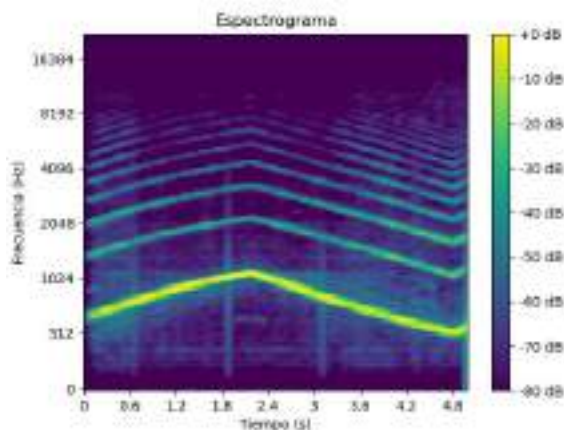


Figura 1. Espectrograma de Mel de Sirena.

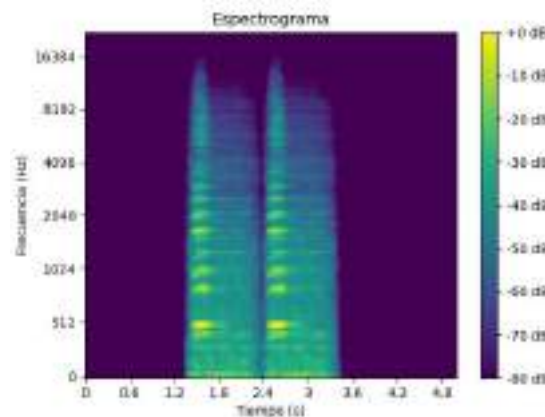


Figura 2. Espectrograma de Mel de Bocina.

3. RECONOCIMIENTO DE SONIDO

En este estudio, se ha desarrollado un sistema de reconocimiento de sonido que funciona como un disparador en tiempo real. Su función principal es detectar la presencia de sirenas y bocinas en el entorno acústico del vehículo, lo que activa el algoritmo de localización basado en TDOA (*Time Difference of Arrival*) que se describe en la sección siguiente.

La arquitectura utilizada para el reconocimiento de sonido se basa en el Audio Spectrogram Transformer (AST) [3], que es una adaptación de las redes *Transformers* [4] diseñada especialmente para analizar espectrogramas. Esta elección de arquitectura se respalda por su eficacia en la clasificación de eventos sonoros, así como su capacidad para aprender y reconocer patrones en representaciones espectrales de señales de audio.

Para entrenar el modelo de reconocimiento de sonido, se utilizó la base de datos Audioset de Google [5], que contiene una amplia variedad de grabaciones de audio etiquetadas con 527 etiquetas diferentes. Una vez que el sistema aprendió a diferenciar entre estas numerosas etiquetas, se modificó la estructura del *transformer* para que solo detectara tres clases: Sirena, Bocina o Nada. De esta manera, cualquier sonido que no perteneciera a las dos primeras categorías se consideraba ruido y no activaba el algoritmo de localización basado en TDOA.

Este segundo entrenamiento se llevó a cabo mediante *transfer learning* [6], desconectando las últimas capas de neuronas del modelo, para introducir unas nuevas que aprendieran solo las etiquetas comentadas anteriormente. Para este cometido, se utilizó la base de datos de UrbanSound8K, aplicando una validación cruzada, usando el método de 10 *k-folds*, tal como se indica en [7]. Esta base de

datos permitió refinar aún más el modelo, asegurando su capacidad para distinguir de manera efectiva entre sirenas, bocinas y otros sonidos ambientales.

El proceso de entrenamiento y validación del sistema se basa en la recopilación de muestras de audio de las bases de datos mencionadas. A partir de estas muestras, se calculan los espectrogramas de Mel como descriptores, que posteriormente se introducen en la red neuronal AST. El proceso de entrenamiento permite al sistema aprender y ajustar sus pesos y parámetros internos para reconocer de manera efectiva los sonidos de interés en el entorno automovilístico, cumpliendo así su función de disparador para la localización de eventos sonoros. Los resultados de la validación cruzada del sistema se pueden observar en Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de acierto de detección en la validación cruzada de la base de datos UrbanSound8K

<i>K-fold</i>	Precisión (%)
1	100
2	87.55
3	91.98
4	98.15
5	97.03
6	97.52
7	97.56
8	99.05
9	93.92
10	98.61
Promedio	96.14

Dado la fiabilidad del modelo, y al funcionar como disparador, se determina un valor umbral de predicción mayor del 90% para que el sistema active el algoritmo de localizador de fuente.

4. LOCALIZADOR DE SONIDO

Para abordar la localización de fuentes en entornos automovilísticos ruidosos, se implementó un sistema de localización de sonido basado en el algoritmo SRP-PHAT (*Steered Response Power with Phase Transform*). Este algoritmo se eligió debido a su destacada capacidad para mantener una alta relación señal-ruido en presencia de interferencias acústicas, lo que resulta fundamental para la localización precisa de fuentes sonoras en condiciones ruidosas.

4.1. Principio de Funcionamiento de SRP-PHAT

El algoritmo SRP-PHAT calcula una función de distribución espacial, que representa la probabilidad de que la fuente de sonido esté ubicada en cada dirección angular posible. Esta

función se calcula mediante una transformación de fase llamada "Phase Transform" (PHAT) que ajusta las señales de los micrófonos para tener en cuenta las diferencias de tiempo. La función resultante se llama "Steered Response Power" (SRP), que muestra la potencia relativa de la señal en diferentes direcciones angulares. [8][9]

Esta última característica es esencial para determinar la procedencia de las fuentes de sonido en el entorno y es especialmente valiosa en condiciones adversas, como entornos ruidosos, donde SRP-PHAT ha demostrado una notable robustez y precisión en la detección de sonidos [10].

4.2. Localización de fuentes

El algoritmo de localización se activa automáticamente una vez que el sistema de reconocimiento de sonido, alimentado por el modelo AST, detecta la presencia de una sirena o una bocina. En ese momento, el algoritmo calcula la dirección de llegada del sonido utilizando SRP-PHAT y utiliza esta información para tomar decisiones apropiadas, como alertar al conductor o permitir que un vehículo de conducción autónoma ajuste su trayectoria en consecuencia.

4.3. Resolución Angular

Dado que este sistema se adapta tanto a conductores manuales como a vehículos de conducción autónoma, la resolución angular se estableció en intervalos de 30 grados, cubriendo un rango de 360 grados. Esto significa que el sistema determina la dirección de llegada del sonido dentro de uno de los doce ángulos predefinidos (por ejemplo, 30 grados, 60 grados, etc.), lo que proporciona información suficiente para tomar decisiones de dirección relevantes sin necesidad de una resolución angular muy alta. La resolución se puede aumentar sin problemas, pero se ha creído suficiente esta resolución para entornos automovilísticos.

5. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Para evaluar exhaustivamente la eficacia y el rendimiento de nuestro sistema de localización de sonido en entornos automovilísticos, se realizaron pruebas utilizando una configuración de simulación meticulosamente diseñada. El objetivo principal de esta fase de experimentación fue recrear condiciones realistas y desafiantes que se asemejaran al entorno de un vehículo en movimiento.

La experimentación se desarrolló en dos fases fundamentales. En una primera etapa, con el propósito de adquirir datos de un entorno automovilístico genuino, se dispuso un conjunto de cuatro micrófonos en el exterior de un vehículo de prueba, tal como se visualiza en la Figura 3. Estos micrófonos fueron estratégicamente ubicados en el vehículo para lograr una captura precisa del entorno sonoro mientras

éste estaba en movimiento. Esta disposición nos permitió recolectar datos reales de ruido de la rodadura del entorno. Posteriormente, en la segunda fase de nuestro experimento, que se explica a continuación, pudimos evaluar el rendimiento de nuestro sistema en situaciones que replicaban las condiciones de conducción real en carreteras.



Figura 3. Micrófono exterior instalado en vehículo

5.1. Montaje del experimento

En el marco de nuestras pruebas de simulación, implementamos una configuración específica en una sala especialmente diseñada para emular condiciones realistas de un entorno vehicular en movimiento. La sala está aislada acústicamente para evitar ruido del exterior, a la vez que está acondicionada acústicamente para minimizar las reflexiones desde las paredes y el techo, creando así un ambiente de prueba, que, aunque no sea anecoico, está muy controlado.



Figura 4. Sala de entorno de simulación automovilística

Para simular los sonidos provenientes de diferentes direcciones, se aprovechó la instalación de un sistema de Wave-Field Synthesis que consta de un array de 96 altavoces

dispuestos en una forma octogonal estirada, de 6.75 metros de largo y 3.45 metros de ancho. Esta configuración nos permitió evaluar el rendimiento de nuestro sistema en un entorno controlado y ajustado a las dimensiones de la sala.

En cuanto a la disposición de los micrófonos, cuyo objetivo es detectar y localizar las fuentes de interés mencionadas, colocamos cuatro micrófonos dentro de la sala, estratégicamente ubicados en el interior del octágono formado por los altavoces, como se ilustra en la Figura 5. Esta disposición se ajustó a las dimensiones de la sala y se escaló para emular un entorno real de carretera.

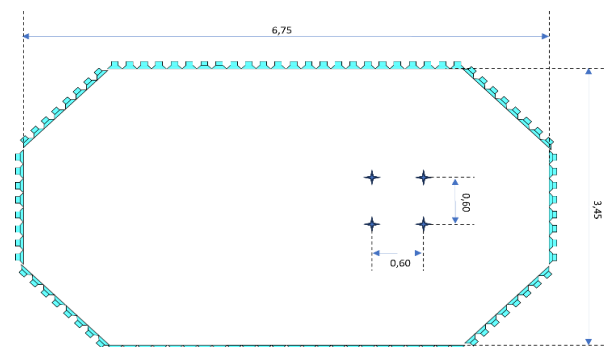


Figura 5. Distribución de altavoces y micrófonos.

5.2 Procedimiento de evaluación

Para llevar a cabo las mediciones, emitimos sonidos de sirenas o bocinas a través de uno de los altavoces durante 20 segundos, mientras que los otros altavoces reproducían el sonido de tráfico real captado del entorno de rodadura de los vehículos que se había grabado previamente. La configuración se repetía en incrementos de 30 grados, cubriendo así todo el diagrama polar. Cabe destacar que, para lograr una mayor fidelidad con el entorno real, dividimos el octógono en cuatro secciones, de modo que cada sección emitía el sonido captado por uno de los cuatro diferentes micrófonos que se instalaron en el vehículo de prueba. Esto aseguró que el sonido de la rodadura tuviera la suficiente especialidad y realismo para el experimento.

5.3 Activación del Sistema Disparador de IA

En el escenario de simulación, implementamos el sistema de inteligencia artificial (IA). Este sistema está conectado a uno de los cuatro micrófonos del conjunto de simulación de micrófonos y opera en tiempo real, analizando de forma continua tramas de audio de 2 segundos. Si el micrófono detecta la presencia de una clase relevante, activa un disparador y clasifica el sonido en una de las clases definidas.

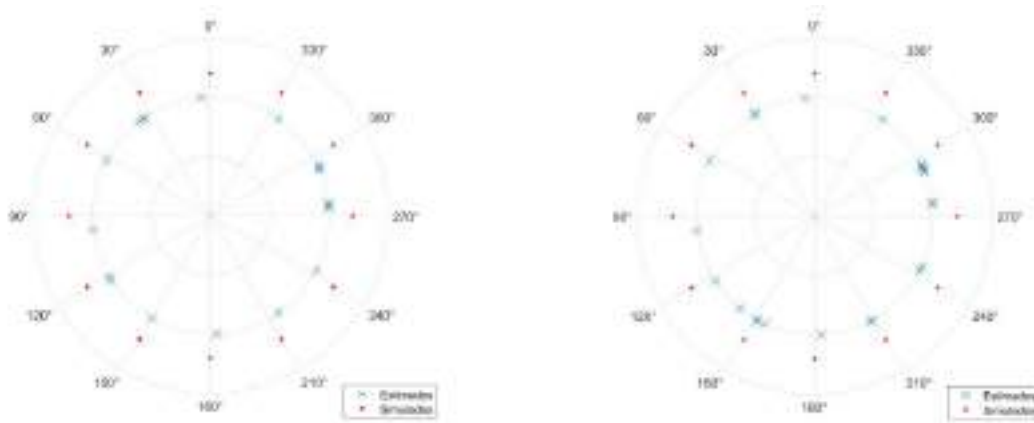


Figura 6. Comparación entre direcciones simuladas y estimadas mediante SRP-PHAT para audio de Sirena (Izquierda) y para audio de Bocina (Derecha).

A continuación, para el tramo de sonido donde está el evento, se analiza la señal de los cuatro micrófonos mediante el algoritmo SRP-PHAT comentado en la sección 4, proporcionando la dirección estimada de llegada.

Posteriormente, se muestra en pantalla tanto la clase detectada como la dirección de llegada. Esta información se mantiene visible en pantalla mientras se continúa detectando la clase relevante. En el momento en que no se detecta ninguna clase relevante, también se informa de este hecho.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para evaluar la eficacia y el rendimiento de nuestro sistema de detección y localización de sonido en entornos automovilísticos, se realizaron pruebas utilizando una configuración de simulación cuidadosamente diseñada. En primer lugar, sometimos nuestro sistema de detección basado en inteligencia artificial (IA) a una serie de pruebas para evaluar su capacidad de identificar con precisión sirenas y bocinas en condiciones simuladas. Se utilizó la base de datos ESC-50[11], que consta de 40 sonidos de sirenas y 40 sonidos de bocinas, y el sistema logró una tasa de acierto del 100%.

El sistema IA demostró una capacidad sobresaliente para detectar de manera precisa y confiable las clases de sirenas y bocinas en todo momento. Cuando no se detectaba ninguna de estas clases de sonidos, el sistema informaba de manera adecuada sobre la ausencia de eventos relevantes. Una vez confirmada su eficacia, se procedió a la siguiente fase de nuestro experimento.

En la segunda etapa, se puso a prueba el sistema de localización de fuentes sonoras utilizando el algoritmo SRP-PHAT. Se seleccionó al azar una sirena y una bocina de la base de datos ESC-50 y se simularon situaciones realistas

haciendo sonar estas fuentes sonoras a través de uno de los altavoces durante 20 segundos. Dado que las tramas de audio se tomaron en intervalos de 2 segundos, se generaron 10 predicciones de ubicación para cada fuente simulada en incrementos de 30 grados. Como resultado, el sistema proporcionó una representación precisa y útil de la procedencia de los sonidos en el entorno vehicular, como se ilustra en la Figura 6.

Es importante destacar que, si bien se observó un ligero aumento en el error de predicción en alrededor del grado 270, esto se alinea con la disposición de los micrófonos en relación con el entorno sonoro. Como se ilustra en la Figura 5, los micrófonos están ubicados más cerca de la zona comprendida entre 0 y 180 grados que de la zona entre 180 y 360 grados. Sin embargo, es fundamental remarcar que el error se mantuvo dentro del margen de resolución angular establecido, lo que garantiza una representación precisa y útil de la localización de fuentes sonoras en condiciones realistas.

7. CONCLUSIONES

En este estudio, hemos desarrollado un sistema basado en inteligencia artificial (IA) que demuestra una capacidad sobresaliente tanto en la detección de sonidos cruciales, como sirenas y bocinas, como en la localización precisa de su procedencia en entornos vehiculares. Nuestro enfoque se apoya en dos componentes clave: el algoritmo SRP-PHAT, que ofrece resultados con una resolución angular de 30 grados, y un sistema de IA que opera como detector/disparador para activar este algoritmo.

La eficiencia de nuestro sistema es notoria en la detección temprana de eventos sonoros relevantes. El sistema de IA, que funciona como disparador, se conecta a uno (o dos para mejorar la detección) de los cuatro micrófonos en el exterior del vehículo de prueba y opera en tiempo real,

analizando tramas de audio de 2 segundos de manera continua. Este componente demuestra una capacidad excepcional para detectar la presencia de sirenas y bocinas en medio del entorno sonoro, lo que desencadena automáticamente la activación del algoritmo SRP-PHAT para la localización precisa de la fuente sonora.

Durante las pruebas de simulación, nuestro sistema sobresale en su capacidad para predecir con precisión la dirección de llegada de las fuentes de sonido. Esta capacidad de localización precisa es particularmente relevante, ya que, en el entorno automovilístico típico, las direcciones de interés suelen estar separadas por intervalos de 30 grados. El rendimiento de nuestro sistema, al superar este umbral de precisión, proporciona una comprensión sólida del entorno sonoro, lo que se traduce en decisiones más informadas y, en última instancia, en una conducción más segura.

En resumen, nuestro sistema representa un avance en la intersección entre la inteligencia artificial y la seguridad vial, ofreciendo una solución efectiva y confiable para la detección y localización de eventos sonoros esenciales en el contexto automovilístico. La eficiencia tanto en la detección de sonidos como en la localización de su origen contribuye a la seguridad en las carreteras y al desarrollo de vehículos más seguros y autónomos.

8. LINEAS FUTURAS

Este estudio sienta una base para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de la seguridad vial y la conducción autónoma. Varias áreas de desarrollo y mejora emergen como oportunidades prometedoras. En primer lugar, consideramos la ampliación de la variedad de sonidos detectables. Aunque nuestro estudio se centró en sirenas y bocinas, la capacidad de detectar y clasificar otros sonidos pertinentes en el entorno automovilístico, como frenazos o neumáticos chirriantes, podría enriquecer aún más la seguridad en las carreteras.

Además, explorar la posibilidad de utilizar modelos basados en Transformers para la detección y localización de sonidos en tiempo real podría representar un avance significativo en la eficiencia computacional y la precisión de nuestro sistema. Esta técnica podría aplicarse tanto al disparador como al localizador, mejorando la capacidad de nuestro sistema para identificar sonidos relevantes y determinar sus ubicaciones de manera más precisa.

La integración de nuestra tecnología con vehículos autónomos también se presenta como un área de investigación prometedora. Incorporar sistemas como el nuestro en vehículos autónomos podría mejorar su capacidad para interactuar con el entorno y tomar decisiones más fundamentadas. Investigar la integración de esta tecnología en el contexto de vehículos autónomos es un paso natural

hacia un futuro más seguro y eficiente en la conducción autónoma.

Estas direcciones de investigación prometen avanzar aún más en la intersección de la inteligencia artificial y la seguridad vial, con la visión de hacer que las carreteras sean más seguras y eficientes para todos los usuarios.

9. REFERENCIAS

- [1] Cai M., Zhong S., Wang H., Chen Y., Zeng W. Study of the traffic noise source intensity emission model and the frequency characteristics for a wet asphalt road. *Appl. Acoust.* 2017; 123:55–63. doi: 10.1016/j.apacoust.2017.03.006
- [2] Wang H., Luo P., Cai M. Calculation of Noise Barrier Insertion Loss Based on Varied Vehicle Frequencies. *Appl. Sci.* 2018; 8:100. doi: 10.3390/app8010100.
- [3] Gong, Y., Chung, Y.-A., Glass, J. AST: Audio Spectrogram Transformer. *Proc. Interspeech 2021*, 571-575, doi: 10.21437/Interspeech.2021-698
- [4] Vaswani, Ashish, Shazeer, Noam, Parmar, Niki, Uszkoreit, Jakob, Jones, Llion, Gomez, Aidan N., Kaiser, Łukasz, Polosukhin, Illia. (2017). "Attention is All You Need." *Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, páginas 30-38
- [5] J. F. Gemmeke et al., "Audio Set: An ontology and human-labeled dataset for audio events," 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), New Orleans, LA, USA, 2017, pp. 776-780, doi: 10.1109/ICASSP.2017.7952261.
- [6] F. Zhuang et al., "A Comprehensive Survey on Transfer Learning," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 1, pp. 43-76, Jan. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3004555.
- [7] Salamon, J., Jacoby, C., Bello, J.P.: A dataset and taxonomy for urban sound research. In: *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia*. pp. 1041–1044. ACM. 2014
- [8] J. Dibiase, A High-Accuracy Low-Latency Technique for Talker Localization in Reverberant Environments Using Microphone Arrays, 2000.
- [9] M. Cobos, A. Marti and J. J. Lopez, "A Modified SRP-PHAT Functional for Robust Real-Time Sound Source Localization With Scalable Spatial Sampling," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 71-74, Jan. 2011, doi: 10.1109/LSP.2010.2091502.
- [10] H. F. Silverman, Y. Yu, J. M. Sachar, and W. R. Patterson III, "Performance of real-time source-location estimators for a large-aperture microphone array," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 593–606, 2005.
- [11] K. J. Piczak. ESC: Dataset for Environmental Sound Classification. In *Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia*, pp. 1015-1018, ACM, 2015.

IA PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN CANTERAS: MODELADO

F. Marcos-Macías^{1*}, R. Tamaki-Moreno¹, M. Cámara^{1,2}, V. Yagüe-Jiménez¹, J.L. Blanco-Murillo^{1,2}

¹ ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense 30, 28040 Madrid

² Information Processing and Telecommunication Center, UPM. Avda. Complutense 30, 28040 Madrid

RESUMEN

La dependencia de materias primas, especialmente en el sector minero, es una pieza clave en la economía actual. Los agregados son vitales, siendo la segunda materia prima más usada después del agua. Transformar digitalmente este sector es clave para optimizar las operaciones. Sin embargo, la supervisión y mantenimiento (predictivo y correctivo) son desafíos poco explorados en este sector, debido a las particularidades del sector, la maquinaria y las condiciones ambientales. Todo ello, a pesar de los éxitos alcanzados en la monitorización con sensores acústicos y de contacto.

Presentamos un esquema de aprendizaje no supervisado que entrena un modelo de autocodificador variacional sobre un conjunto de registros de sonido. Se trata del primer conjunto de datos de estas características recabado durante las operaciones de las plantas de procesamiento, y que contiene información de distintos puntos de la línea de procesado.

Los resultados evidencian la capacidad del modelo para reconstruir y representar en el espacio latente los sonidos registrados, las diferencias en las condiciones de operación y entre los distintos equipos. En el futuro, esto debe facilitar la clasificación de los sonidos, así como la detección de anomalías y patrones de degradación en el funcionamiento de la maquinaria.

ABSTRACT

Dependence on raw materials, especially in the mining sector, is a key part of today's economy. Aggregates are vital, being the second most used raw material after water. Digitally transforming this sector is key to optimizing operations. However, supervision and maintenance (predictive and corrective) are challenges little explored in this sector, due to the particularities of the sector, machinery and environmental conditions. All this, despite the successes achieved in other scenarios in monitoring with acoustic and contact sensors.

We present an unsupervised learning scheme that trains a variational autoencoder model on a set of sound records. This is the first such dataset collected during processing plant operations, containing information from different points of the processing line.

Our results demonstrate the model's ability to reconstruct and represent in latent space the recorded sounds, the differences in operating conditions and between different equipment. In the future, this should facilitate the classification of sounds, as well as the detection of anomalies and degradation patterns in the operation of the machinery.

Palabras Clave— Artificial Intelligence, Predictive Maintenance, Noise Characterization, Self-supervised Learning, Variational Autoencoder.

1. INTRODUCCIÓN

Las materias primas desempeñan un papel fundamental en la economía y la industria. Actualmente, distintos países se enfrentan a un desafío constante por asegurar el suministro [1] y la sostenibilidad en la obtención, procesamiento y empleo de estas materias [2]. El objetivo es asegurar la competitividad dentro del mercado global, y promover el desarrollo económico y tecnológico que le permita asegurar el autoabastecimiento, así como una evolución continua y controlada de los costes de producción y los precios de venta [3], así como el reciclaje y la reutilización de los espacios [4].

La Unión Europea ha adoptado una estrategia integral que abarca desde la extracción y producción de materias primas hasta su reciclaje y reutilización [5]. Con ello, se busca minimizar los impactos ambientales y sociales negativos asociados con su producción y uso [6]. Ello permite optimizar el acceso a los recursos, reduciendo la dependencia de terceros países y fomentando la investigación y la innovación en tecnologías que permitan un uso más eficiente y la transición hacia una economía circular [7] [8].

* **Autor de contacto:** fernando.marcos.macias@alumnos.upm.es

Copyright: ©2023 F. Marcos-Macías et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Estos esfuerzos se alinean con los de la industria minera para dar respuesta al reto pendiente de la digitalización. El trabajo es particularmente intenso en el caso de los áridos, que constituyen la segunda materia prima más empleada después del agua, y son un componente básico en la construcción de edificios, carreteras e infraestructuras [9]. En este sector, el número de negocios familiares es alto, el precio de venta por unidad es bajo y el número de trabajadores en planta es cada vez menor [10], muchas se encuentran en localizaciones con conectividad limitada [11], cubren extensiones de terreno amplias y sufren de condiciones ambientales extremas: calor y frío, altos niveles de polvo, humedad, etc. [12].

La optimización en la gestión optimizada de los recursos, la monitorización del proceso productivo y la seguridad, son aspectos críticos para alcanzar un resultado favorable [13] [14]. El desarrollo y la proliferación de los sistemas de sensado autónomo, la llamada Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) y la inteligencia artificial (IA), están propiciando continuos cambios y avances. A pesar de ello, las características particulares del sector han hecho que este proceso esté siendo particularmente lento. Todavía son necesarias acciones conjuntas y desde las Administraciones, para fomentar el desarrollo industrial del sector y asegurar su continua evolución [5]. Proyectos como DigiEcoQuarry [15] buscan acelerar este proceso de transformación digital [11], manteniendo un enfoque transversal sobre todo el proceso de producción, y prestando especial atención a las necesidades de la industria y de todos los agentes involucrados.

Entre los varios puntos de trabajo en las operaciones de las plantas de procesado, los procedimientos orientados a la monitorización de la maquinaria [16] y el mantenimiento predictivo [17] [18] son algunos de los más relevantes y a los que se ha asignado un mayor potencial de impacto. Los métodos tradicionales para evaluar el estado y el funcionamiento presente y futuro de los sistemas industriales involucran el uso de técnicas de monitorización de la vibración, el rendimiento, o el sonido, entre otros. Estos enfoques requieren instalar sensores tanto de contacto, como acelerómetros, sondas de proximidad, transductores de presión y transductores de temperatura [19], como aéreos, como pueden ser los micrófonos o cámaras [20]. Estos segundos ofrecen grandes ventajas. Además de que no requieren contacto físico, su instalación se puede realizar de forma rápida y económica, evitando restricciones habituales en cuanto al espacio y el coste de sensores más caros. Todo ello es especialmente claro en el caso de los sensores acústicos, donde los componentes son fácilmente sustituibles y sus costes son bajos.

Las señales acústicas recopiladas contienen información relevante sobre la salud operativa de la máquina; pero también son sensibles al ruido de fondo y a los cambios en

las condiciones de funcionamiento de la máquina. Esto ha sido ampliamente estudiado [19] en sectores como la automoción [21], la aviación o la hidráulica [22], alcanzando un buen número de casos de éxito. Sin embargo, ni la literatura científica ni las distribuidoras comerciales han registrado trabajos, estudios o productos similares en canteras. Tampoco orientados a la aplicación en la planta de procesado, ni a la aplicación de la IA y su integración.

Durante décadas el estudio de las señales acústicas en las canteras se ha centrado en el impacto acústico de estas instalaciones en el entorno o en sus operarios [23]. Esto resulta especialmente relevante allí donde se desarrollan voladuras, pero es igualmente crítico en cuanto a la maquinaria y los equipos.

En este sentido los trabajos científicos desarrollados con los operarios han evidenciado el valor de la información sonora en la gestión y operación de las canteras. Los propios operadores son los primeros en subrayar su valor para identificar y localizar los problemas y fallos dentro de las instalaciones, así como reconocen la imposibilidad de mantener una monitorización suficiente de las plantas sobre esta información sin medios automáticos.

El objetivo de este trabajo es paliar esta carencia, desarrollando una primera aproximación a la tarea. La forma de hacerlo requiere empezar por recabar nuevos registros en planta y diseñar un esquema de modelado y caracterización apropiado. Esto debe permitirnos describir los sonidos registrados, representarlos convenientemente, y empezar a clasificarlos. El trabajo presenta los resultados de una primera aproximación al problema.

El trabajo se ha estructurado en siete secciones. La sección 2 repasa el estado del arte sobre la detección de anomalías mediante el procesado de registros acústicos, así como las técnicas de Inteligencia Artificial empleadas en estas tareas de representación y modelado. En la sección 3 se presenta el esquema beta-VAE propuesto para la caracterización y modelado de los registros, empleando representaciones del sonido que permiten reconstruir la fase. En la sección 4 se presentan los materiales empleados, en particular las bases de datos recabadas. En la sección 5 se describen los experimentos desarrollados, cuyos resultados se incluyen en la sección 6. Por último, la sección 7 incluye las conclusiones del trabajo y una lista de trabajos futuros a trabajar.

2. ESTADO DEL ARTE

La detección de anomalías acústicas con vistas a la detección de defectos en el funcionamiento y el mantenimiento predictivo de maquinaria es una tarea bien conocida y trabajada durante décadas. El estado del arte recoge extensos trabajos de aplicación [21] [22] [24]. Además, existen

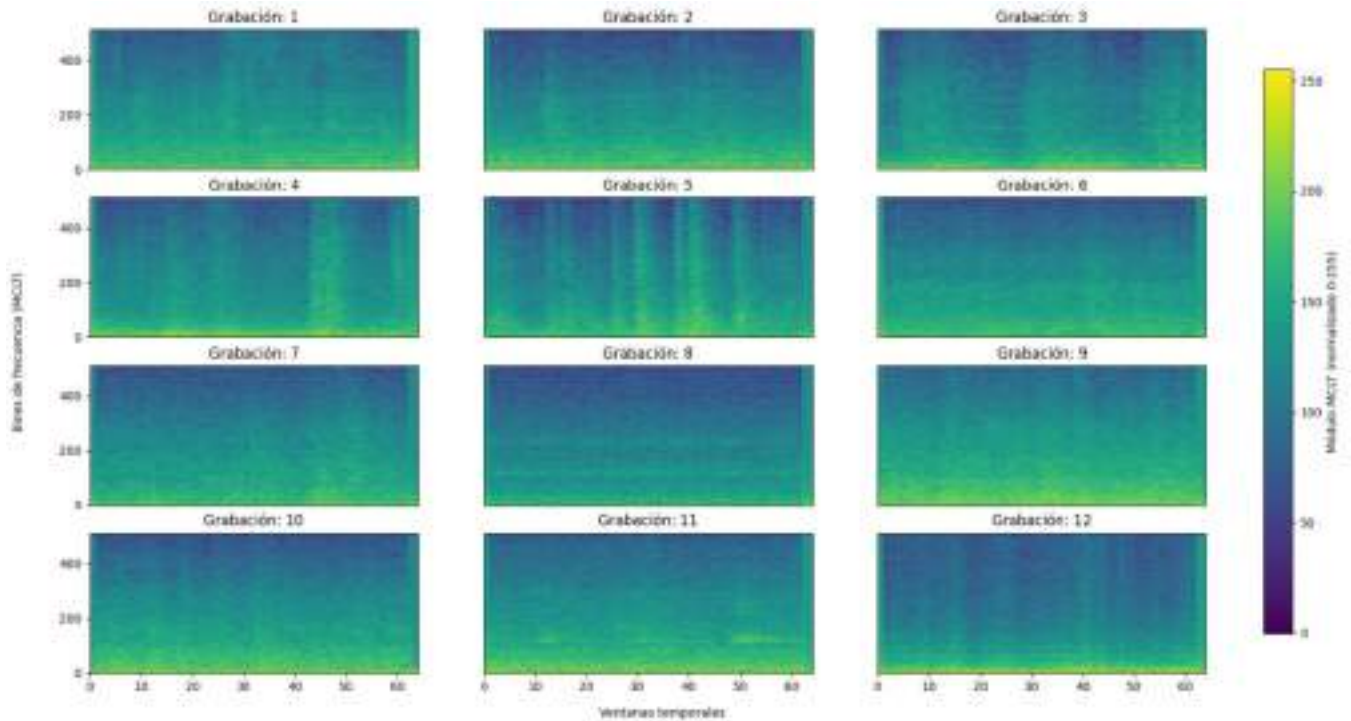


Figura 1. Representaciones MCLT de doce de las grabaciones registradas. En todas es posible observar el carácter ruidoso de los sonidos registrados, si bien es posible identificar ventanas asociables con golpes (gran ancho de banda, bandas verticales) y otras donde se observan componentes periódicas a lo largo del tiempo (bandas horizontales).

amplias revisiones acerca del estado del arte sobre las técnicas subyacentes para la detección de estas anomalías, que en buena medida podemos agrupar en dos bloques. Aquellas orientadas a la ingeniería de características (en inglés, *Feature Engineering*) y aquellas más recientes guiadas por los avances del aprendizaje automático, el aprendizaje profundo y la inteligencia artificial [26].

El paso de unas a otras es crítico, dado que las primeras se centran en desarrollar pruebas controladas para la sección de los parámetros de representación más adecuados. Típicamente, estadísticos de orden por ventanas o segmentos. En cambio, las segundas emplean representaciones convencionales (espectros, coeficientes MEL o BARK, etc.), y modelos avanzados para obtener nuevas formas de cuyas propiedades resulten más ajustadas a la tarea a desarrollar.

Al comparar ambas estrategias comprobamos que la primera presenta grandes ventajas en cuanto al número de parámetros, la posibilidad de trabajar con un número de datos relativamente menor, y la robustez frente al ruido. Por el contrario, adolece importantes limitaciones en cuanto a su capacidad de representación, dificultades para encontrar relaciones complejas y una dependencia excesiva de las decisiones tomadas por los expertos. En el caso de las técnicas no supervisadas, es posible alcanzar un buen resultado y una buena capacidad de representación, si bien el número de datos necesarios para ello es más elevado.

Los autocodificadores convencionales están limitados en cuanto a su capacidad para representar datos no observados, o en su defecto, alejados en un cierto sentido de las muestras empleadas en el entrenamiento. Esto restringe su uso en aplicaciones de mundo abierto, y sobre todo cuando el conjunto de datos de entrenamiento es muy limitado.

En este trabajo nos centramos en los autocodificadores variacionales partiendo de representaciones espectrales de registros segmentados uniformemente y sin etiquetas. Como hemos comentado, el empleo de autocodificadores para la detección de anomalías en procesos industriales no es nuevo [20]. Sin embargo, nunca se han empleado en su versión variacional para el modelado de señales de audio registradas en ambientes tan ruidosos, ni tampoco sobre registros estereofónicos. Todo esto resulta de especial interés cuando se emplean montajes en los que los micrófonos podría permitirnos una reconstrucción espacial mínima que permita localizar las fuentes sonoras [27], y cuando se busca tratar anomalías en registros cuya naturaleza es de por sí ruidosa.

3. EL MODELADO DEL SONIDO

En esta sección presentamos el modelo diseñado y entrenado para recoger las características de los registros sonoros recabados en la cantera. Todo ello con vistas a la detección de patrones anómalos en su comportamiento o que en su

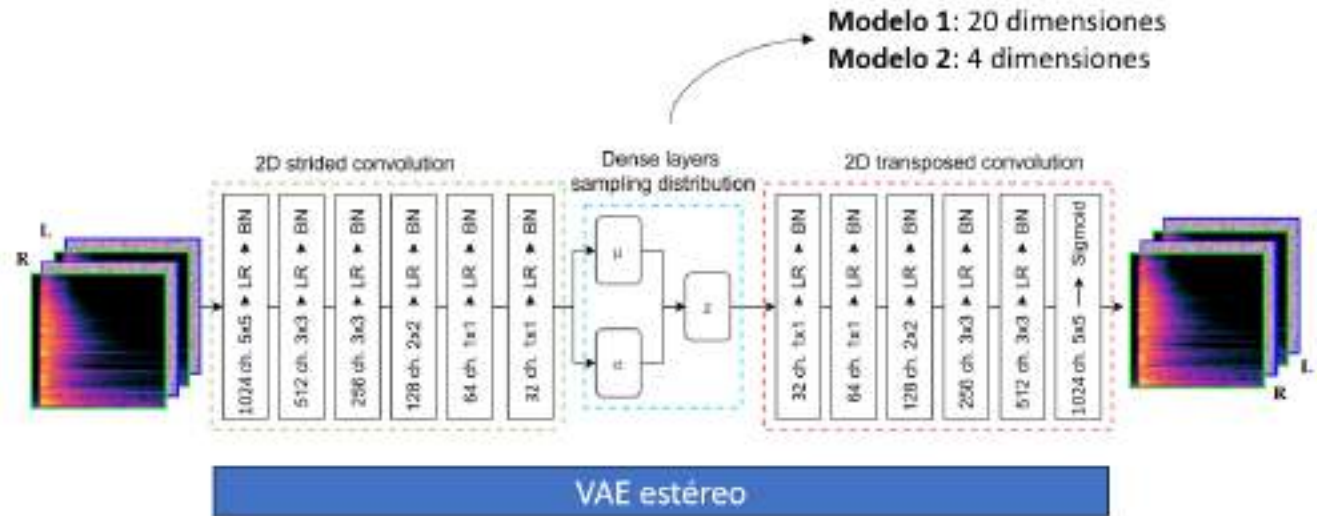


Figura 2. Esquema general del beta-VAE entrenado. El esquema incluye los dos canales estéreo (Right, Left) y las dos representaciones de módulo y fase para cada uno de ellos. Se han considerado hasta tres dimensiones para el espacio latente: modelo 1 (20 dimensiones), modelo 2 (4 dimensiones), modelo 3 (50 dimensiones).

condición pudieran dar lugar a variaciones en el sonido que puedan servir como predictores del estado de la operación o de los equipos industriales.

El VAE es una arquitectura de aprendizaje profundo que codifica sus entradas en puntos de un nuevo espacio de variables latentes, y las decodifica de nuevo en señales de salida. En audio estas entradas y salidas suelen ser espectrogramas o representaciones similares basadas en el análisis frecuencial. Por el contrario, los vectores codificados del espacio latente, carecen de esta naturaleza y presentan una dimensionalidad mucho menor. El VAE se construye en una única fase siguiendo los mismos pasos que los demás autocodificadores, mientras que la codificación y la decodificación emplean la misma estructura de parámetros.

El entrenamiento de la red se centra en evaluar los valores de las media y varianzas del modelo normal estándar impuesto al espacio latente en su distribución. En este punto, el esquema variacional puede incorporar términos adicionales en el error que permitan controlar su aprendizaje. El caso más sencillo y popular es el del beta-VAE, que toma su nombre del parámetro β que controla el aprendizaje ponderando la función de error del VAE con la divergencia Kullback-Leibler en la distribución asignada al espacio latente. Los detalles de las distintas implementaciones están ampliamente descritos en la literatura, siendo crítico conocer la naturaleza probabilística del entrenamiento y la naturaleza multidimensional de la representación latente [28].

Para el modelado de registros con varios canales cabe introducir importantes cambios en la estructura habitual de un VAE. Por ejemplo, podemos considerar por separado cada

uno de los canales, evaluando varios VAEs monoaurales, en paralelo pero sin interacción, o en conjunto, permitiendo la interacción entre los distintos canales. Esencialmente, la estructura de dos VAEs monoaurales duplica el número de coeficientes, mientras que un esquema estereofónico debe ser capaz de trabajar sobre una única representación, en un único espacio latente. En todo caso, el esquema estéreo emplea información mínima de etiquetas que permiten mantener separados los dos canales (derecho e izquierdo).

La Fig. 2 ilustra el modelo de beta-VAE propuesto, incluyendo los dos canales de audio (derecho e izquierdo) y dos representaciones para cada uno, correspondientes al contenido de amplitud y fase. La importancia de esta separación ha quedado demostrada en trabajos anteriores, con vistas a la reducción del error de reconstrucción y a un mejor tratamiento del contenido sonoro de los registros [29].

El entrenamiento del VAE minimiza el error de reconstrucción de las salidas respecto de las entradas, lo que nos permite centrarnos en primera instancia en el modelado de los registros, sin necesidad de abordar otros aspectos tales como la posterior capacidad de detección de efectos espurios. De esta forma, asumimos que estas posibles anomalías tendrán una representación diferente al resto en el espacio latente. Esto nos permitirá posteriormente identificarlas y detectarlas, sencillamente por el reflejo en el espacio latente de las diferencias en el contenido acústico. Como consecuencia, podemos centrarnos en primera instancia en el entrenamiento de los modelos, debiendo evaluar en último término no sólo las reconstrucciones (la capacidad de modelado) o la capacidad generativa, sino también las representaciones asociadas a posibles anomalías.

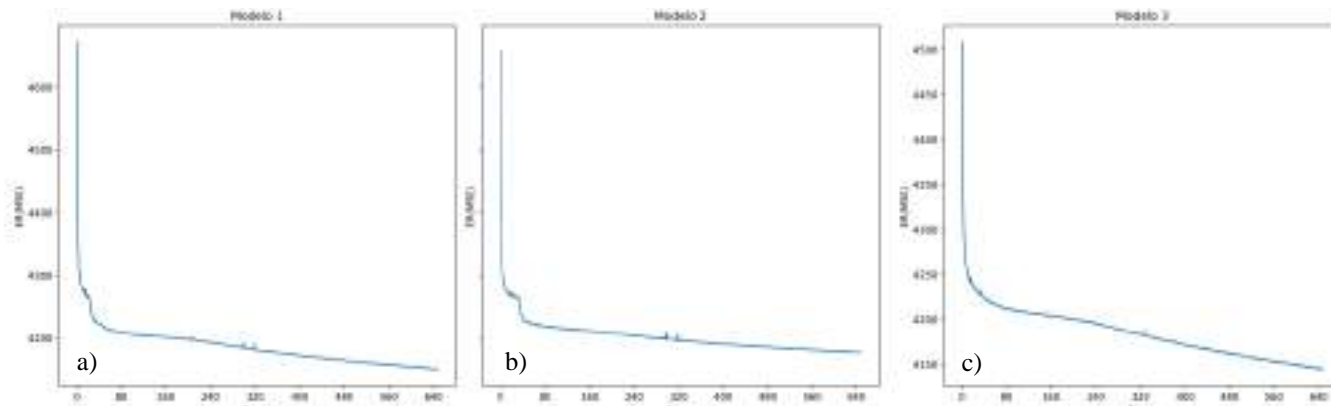


Figura 3. Resultados del entrenamiento de los tres modelos a lo largo de las distintas épocas. En todos los casos se observa un rápido descenso en el error cuadrático medio al inicio y un decaimiento sostenido al final.

Algunos trabajos previos han adaptado la métrica de error a las métricas perceptuales que imitan el comportamiento del oído humano. En nuestro caso trabajamos con el error cuadrático medio, como se recoge habitualmente en la literatura, evitando sobrecostes computacionales.

Adicionalmente a todo lo anterior, la literatura recoge alternativas de interés cuando se quiere abordar un posterior proceso de clasificación o de detección (i.e., clasificación en dos clases). El empleo de estructuras adversarias después de entrenar el VAE y sólo para corregir el decodificador parece haber permitido alcanzar importantes mejoras en la calidad de las reconstrucciones de secuencias continuas, sin lastrar el entrenamiento inicial del VAE [30]. Esta posibilidad invita a pensar en estructuras alternativas a la propuesta, y en futuras mejoras una vez que se logre modelar el contenido acústico de los registros de manera no supervisada.

4. MATERIALES

Para este trabajo hemos recabado un conjunto de registros que contiene más de 4 horas de grabaciones recogidas en distintos puntos de tres canteras diferentes. En cada una se tomaron registros de más de 20 minutos cubriendo áreas donde operaban cuatro componentes principales: cintas, molinos, machacadoras y cribas. En este sentido, es importante destacar las características ambientales de las canteras de áridos pueden ser muy variadas, pero en general destacan los altos niveles de polvo (particularmente en explotaciones de extracción fuera del agua), los niveles de humedad (en graveras), la variabilidad del viento en su dirección e intensidad, amplia excursión a lo largo de escalas de temperatura en función del clima y la estación, etc. Todo esto hace necesario repetir las medidas en nuevos entornos, y tomar precauciones para evitar dañar los equipos.

La captura se realizó con una grabadora ZOOM H8 de ocho pistas independientes y con autonomía de más de diez horas. Ésta tenía acoplada una cápsula X/Y XYH6 que emplea dos

micrófonos unidireccionales de alta calidad colocados en ángulo. Esta configuración es óptima para cubrir un área amplia y aún así capturar una potente imagen central. En este caso, se evitó proteger los micrófonos con ningún elemento que pudiera afectar la calidad de las señales registradas o modificar su contenido frecuencial. Trabajos posteriores deberán evaluar la necesidad de incluir estos elementos, particularmente en instalaciones permanentes.

La grabadora permitió recoger registros completos de más de media hora, permitiendo además la comprobación *in situ* de la calidad de los audios. Posteriormente, todos los registros fueron fragmentados a una duración de segmento igual, conservando únicamente las etiquetas de los distintos ficheros para posteriores comprobaciones. La información relativa a los elementos de la planta de producción en cuyo entorno se situó la grabadora no se ha empleado en el entrenamiento, si bien será tenida en cuenta en la evaluación del modelo entrenado (ver Sección 6).

La representación elegida para los fragmentos de audio recortados corresponde a los coeficientes de la Transformada Modificada del Coseno, MCLT. El motivo detrás de esta elección viene justificado por trabajos previos que ilustran la importancia de cuidar la información de fase, aun cuando el contenido frecuencial de los registros sea ruidoso [29].

La Fig. 1 muestra a modo de ejemplo las representaciones MCLT de doce segmentos extraídos de registros distintos de la base de datos. Cada uno de los segmentos contiene 31,994 muestras, mientras que todas las grabaciones fueron registradas a 48 kHz de frecuencia de muestreo y con 24 bits de profundidad en cada muestra. Esta misma representación se empleó en todos los ficheros registrados.

5. EXPERIMENTOS

Hemos desarrollado cuatro experimentos para validar el comportamiento del modelo entrenado, y considerado tres variaciones sobre el esquema de VAE estéreo. Los tres

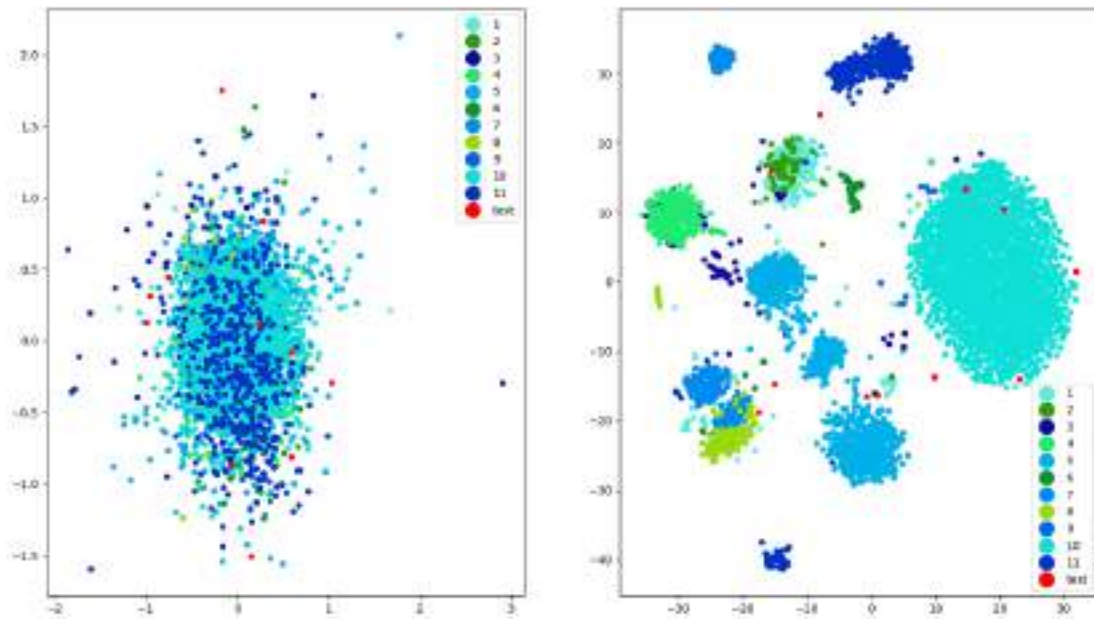


Figura 4. Representaciones del espacio latente obtenida para el modelo 1 (20 dimensiones): a) PCA (izquierda), b) t-SNE (derecha). Los colores codifican los distintos registros de audio, se representa un punto por cada fragmento recortado. Los puntos en rojo representan datos anómalos, importados para evaluar el comportamiento de los modelos entrenados.

modelos emplean el mismo esquema, variando el número de dimensiones del espacio latente. Hemos considerado tres valores, 20, 4 y 50 dimensiones, en base a nuestra experiencia previa y ensayos preliminares. Un estudio exhaustivo de este parámetro podría resultar en una mejora poco significativa de los resultados reportados en este trabajo, pero en ningún caso debe ofrecer nueva luz sobre el sistema desarrollado.

La Fig. 3 ofrece una vista general sobre el proceso de entrenamiento de los tres modelos en base al error cuadrático medio en la reconstrucción. Los tres modelos evidenciaron un rápido proceso de descenso del error al principio, y presentan una zona de decaimiento más lento y sostenido al final del entrenamiento que no llega a culminar. Esto nos hace pensar que los modelos obtenidos pueden servir como referencia en investigaciones posteriores centradas en la mejora del proceso de entrenamiento. En todo caso, resulta interesante comprobar que la tendencia que se observa al final es más abrupta a medida que aumenta el número de dimensiones del espacio latente, pero en ningún caso de una forma determinante.

En vista de los modelos obtenidos, a continuación, describimos los cuatro experimentos desarrollados a fin de evaluar la calidad del modelado realizado. Cada uno de ellos aborda un aspecto diferente del modelo resultante, empezando por el error de reconstrucción a la salida del VAE hasta la estructura del espacio latente y un estudio preliminar sobre la capacidad del esquema propuesto para representar anomalías.

5.1. Evaluación del error de reconstrucción

Esta evaluación involucra únicamente el error cuadrático medio que se obtiene en la reconstrucción de las entradas a la salida del VAE. Esta métrica coincide con la que se emplea en el proceso de entrenamiento, lo que nos permite comprobar el comportamiento de los modelos finalmente seleccionados.

En este caso, los modelos seleccionados no son los que se obtienen al final del entrenamiento, sino los que se tienen al inicio de la cuesta de decaimiento sostenido del error. De esta forma podemos comparar los tres modelos del esquema propuesto en condiciones similares.

5.2. Evaluación de la calidad de reconstrucción

Además de considerar el error cuadrático medio, resulta muy relevante evaluar otras métricas de error que puedan incorporar aspectos perceptuales. Tal y como hemos explicado, en la práctica, sabemos que los operarios de las canteras se sirven de la información acústica para monitorizar las operaciones, detectar problemas e incluso para verificar que han sido correctamente resueltos.

Por esta causa, hemos comparado los resultados del error cuadrático medio con los valores MOS de PEAQ y ViSQOL tanto en la media como en su dispersión. Estos valores nos dan una idea de la capacidad de representación del modelo entrenado y del error esperable.

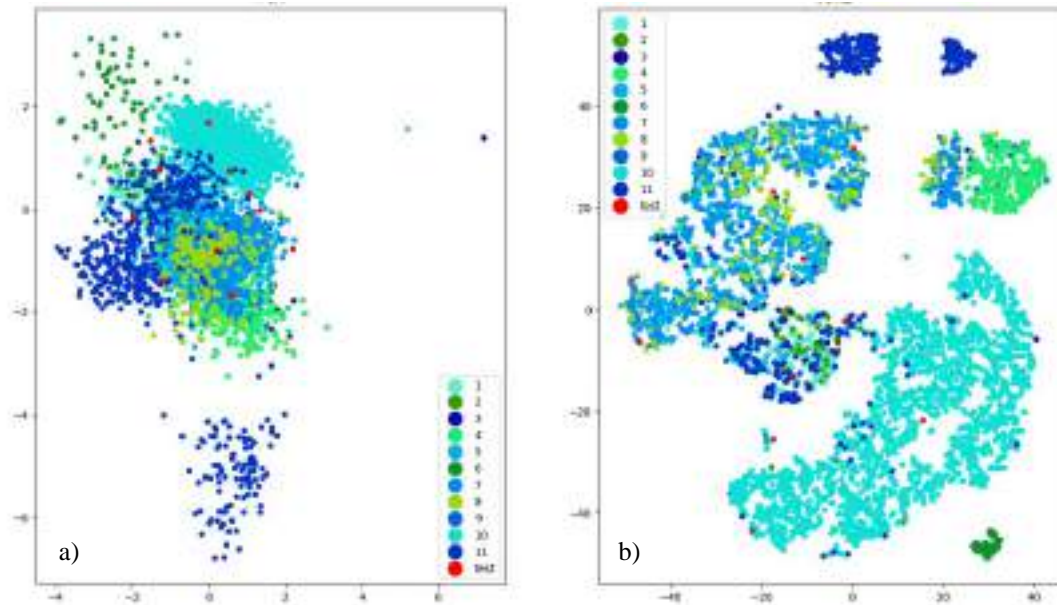


Figura 5. Representaciones del espacio latente obtenida para el modelo 2 (4 dimensiones): a) PCA (izquierda), b) t-SNE (derecha). Los colores se codifican de la misma forma que los de la Fig. 4.

Adicionalmente a las pruebas realizadas sobre métricas objetivas que aproximan a las subjetivas, los audios generados se encuentran disponibles en abierto para su consulta². Es muy recomendable dedicar unos minutos a escuchar tanto los registros originales grabados como sus reconstrucciones a fin de valorar la calidad del modelado y comprender la dimensión del reto que abordamos.

5.3. Evaluación del espacio latente: PCA & t-SNE

Dadas las características de los audios que nos ocupan (fundamentalmente ruidosos) es importante considerar no sólo la calidad de la reconstrucción que ofrece nuestro modelo no supervisado, sino también las características del espacio latente. Es bien sabido que las propiedades de los datos procesados por el autocodificador van a reflejarse o bien en su estructura (pesos de la red) o en las propiedades de su representación codificada (espacio latente). Las segundas son particularmente interesantes en nuestro caso, puesto que se centran en las variaciones más representativas de los sonidos, y por tanto, son fuentes de información relevante.

En este caso, dada la dimensionalidad del espacio latente entrenado (desde 4 dimensiones hasta 50), es necesario emplear algoritmos de reducción de la dimensionalidad como PCA (análisis de componentes principales) o t-SNE (*t-distributed Stochastic Neighbor Embedding*). Ambos son herramientas de uso habitual para la visualización del espacio latente. El primero se centra en las propiedades generales del

espacio e identifica dimensiones ortogonales donde se concentra la varianza. El segundo se centra en sus propiedades locales de los datos proyectados en el espacio latente. En particular, trata de preservar las distancias entre los vecinos en el espacio latente multidimensional, tras la proyección en el espacio de menor dimensión y mayor inteligibilidad. Tanto para PCA como para t-SNE empleamos una reducción a dimensión dos lo que debe facilitar la visualización de los datos.

5.4. Estudio preliminar de anomalías

Finalmente, a modo de ejemplo, hemos analizado la presencia de anomalías en los conjuntos de datos. Para ellos hemos asumido que los conjuntos recabados, homogéneos o no, representan una situación de operación normal en la cantera, y que por tanto, no contenían anomalías severas. Bajo esta hipótesis, hemos añadido fragmentos de un audio que registra una grabación de una pieza de maquinaria dañada. Con vistas al sistema de mantenimiento predictivo y a la detección de anomalías, cabe esperar que los fragmentos de este registro tengan un comportamiento diferencial comparado con los recabados en la cantera.

Los fragmentos evaluados, cumplen con los requisitos de las restantes grabaciones (duración de los segmentos, frecuencia de muestreo, precisión en la codificación, etc.), pero no fueron registrados con el mismo dispositivo ni en el mismo ambiente acústico. Por tanto, cabe considerar que se

² <https://fermarcosmac.github.io/vae-estereo-canteras/>

trata de un elemento fuera del dominio. Sin embargo, se ha podido verificar manualmente que su contenido se ajusta al del ruido de maquinaria con defectos en su funcionamiento, asumiendo que éste debe poder tener un patrón característico en su representación latente.

Este patrón característico debe ser identificable en el espacio latente de los modelos. Dada la elevada dimensionalidad de este espacio volvemos a emplear las visualizaciones de la subsección anterior (PCA y t-SNE), incorporando ahora los datos correspondientes a las proyecciones de los segmentos del nuevo audio en el espacio latente. En este caso, dada la naturaleza de los datos, podemos sencillamente considerar ambos experimentos de forma conjunta, y representar sus resultados agregados, incluyendo los registros de la base de datos y los fragmentos anómalos.

6. RESULTADOS

A continuación detallamos las figuras y tablas muestran los resultados de las distintas evaluaciones siguiendo el orden de la Sección 5. En primer lugar, la Tabla 1 resume los resultados obtenidos en la reconstrucción con los tres modelos y para las tres métricas consideradas: error cuadrático medio, ViSQOL y PEAQ. Los resultados obtenidos evidencian cómo la media y la varianza del error cuadrático medio están muy próximas, pero ambos valores son bajos. Esto supone en la práctica que el error de reconstrucción sea relativamente bajo, lo que puede ser consistente con la naturaleza ruidosa de los registros.

Tabla 1. Resumen de los resultados por los tres modelos entrenados sobre las métricas de calidad objetiva evaluadas: error cuadrático medio (MSE), ViSQOL y PEAQ.

Modelo	Estadístico	MSE	ViSQOL	PEAQ
M1	Media	$1.58 \cdot 10^{-6}$	3.17	-3.70
	Varianza	$1.55 \cdot 10^{-6}$	0.34	0.44
M2	Media	$1.73 \cdot 10^{-6}$	3.16	-3.48
	Varianza	$1.51 \cdot 10^{-6}$	0.36	0.63
M3	Media	$1.78 \cdot 10^{-6}$	3.14	-3.75
	Varianza	$1.52 \cdot 10^{-6}$	0.35	0.38

Por otro lado, los resultados obtenidos en las métricas ViSQOL y PEAQ difieren entre sí. En esta ocasión ViSQOL ofrece unos resultados bastante positivos, mientras que los de PEAQ son peores. Además, la varianza es sostenidamente menor para ViSQOL que para PEAQ. En este caso, es importante recalcar que la naturaleza ruidosa de los registros contrasta en cierta medida con el tipo de grabaciones que habitualmente evalúa ViSQOL, esto, unido a una evaluación subjetiva de los registros generados nos hace pensar que la calidad de la reconstrucción es todavía muy limitada, aún para el Modelo 3, con 50 dimensiones en su espacio latente.

En cuanto a la complejidad del modelo, sorprende que los valores obtenidos en las tres métricas sean análogos para un número de dimensiones tan dispar (de 4 a 50). Esto, ligado a las curvas de la Fig. 3 nos hace pensar en la necesidad de profundizar en las representaciones, abordando alternativas más centradas en la naturaleza ruidosa de los registros.

Una vez analizadas las métricas de calidad en reconstrucción abordamos la estructura del espacio latente de los modelos entrenados. En este caso hemos incluido los resultados del PCA y del t-SNE para los modelos 1 y 2 en las Figs. 4 y 5, respectivamente. Los resultados del modelo 3 (50 dimensiones) fueron totalmente análogos a los del modelo 1 (20 dimensiones), por lo que no se han incluido.

Las representaciones aportadas no solo muestran los datos sobre dos espacios de dimensionalidad reducida, sino que además representan en color los distintos registros que se están representando. Cabe recordar que en nuestro conjunto de datos cada registro corresponde a un punto de grabación, y potencialmente con una instalación diferente, lo que supone que estemos analizando audios asociados con distintos elementos de la planta de procesamiento, en distintos momentos e incluso en distintas localizaciones. En este caso hemos incluido no sólo fragmentos de los registros recabados en las canteras (Experimento 3), sino también fragmentos de un registro anómalo tomado de otro conjunto de datos (Experimento 4). Estos últimos han sido representado en rojo para facilitar su visualización.

A la izquierda de cada una de las figuras se observa el análisis de componentes principales reducido a dos dimensiones. En este caso, el modelo 2 (Fig. 5.a) parece representar dos clústeres diferenciados mientras que el modelo 1 (Fig. 4.a) sólo contendría uno. En este caso, la estructura del beta-VAE sugiere que la estructura del espacio latente debe ser normal, lo que estaría en consonancia con esta figura. El hecho de que los fragmentos de los distintos registros se entremezclen también sería consistente con esta estructura normal de los datos, en vista de que la proporción de fragmentos debe ser análoga para todos los registros.

En cuanto a los t-SNE, difieren considerablemente. El correspondiente al modelo 2, de menor dimensionalidad en el espacio latente, Fig. 5.b, entremezcla los distintos registros, aun cuando da lugar a formas particulares que evidencian la existencia de una estructura subyacente en el espacio latente. Por el contrario, el correspondiente al modelo 1, Fig. 4.a, logra separar en clústeres los distintos registros.

Finalmente, en cuanto a la anomalía, las representaciones obtenidas no separan claramente las proyectos de los fragmentos asociados, si bien los ubican en posiciones muy dispares dentro del espacio latente, lo que puede servir en un futuro para su detección.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado un esquema de modelado de audio basado en un autocodificador variacional para el mantenimiento predictivo en canteras. El esquema tiene la estructura de un beta-VAE y fue capaz de representar los distintos sonidos recabados en las plantas de procesado de distintas canteras.

El entrenamiento desarrollado fue capaz de ofrecer un modelo capaz de regenerar los sonidos, así como también de generar nuevos sonidos a través del muestreo del espacio latente del VAE. El esquema evaluado emplea representaciones basadas en la MCLT, a fin de mejorar el tratamiento habitual que dan los esquemas basados en la magnitud de la transformada local de Fourier.

El error en la reconstrucción de los audios en base al modelo entrenado es bajo entorno a 10^{-6} en error absoluto y aceptable (MOS=3) cuando empleamos la métrica de evaluación de calidad ViSQOL. En cambio, PEAQ ofrece todavía resultados bajos, consistentes con lo observado tras las escucha de los audios reconstruidos.

Se trata del primer trabajo de estas características publicado, y el primero centrado específicamente en las líneas de procesamiento de canteras de áridos. El trabajo emplea un nuevo conjunto de datos recabado en distintas canteras, dentro de las actividades del proyecto H2020 DigiEcoQuarry, capturado en tres canteras de áridos en Italia (HOLCIM, Pioltello), Francia (VICAT GRANULATS, Toulouse), y España (HANSON, Valdilecha). Cada una de ellas presenta características operativas propias (gravera, de recuperación, y de explosión en superficie), pero incorporan elementos comunes en las líneas de procesado: tolvas, molinos, cintas, machacadoras y cribas, principalmente.

El esquema desarrollado se ha centrado en molinos, cintas, machacadoras y cribas, sin emplear ningún tipo de etiquetado en el entrenamiento. Este trabajo demuestra que un esquema de aprendizaje no supervisado como el descrito logra captar y registrar las características del ambiente sonoro, lo que ofrece importantes ventajas a la hora de desarrollar un esquema predictivo. Entre otras, evita la necesidad de etiquetar los datos a priori, permite comprimir los registros de audio hasta la dimensión asignada al espacio latente, y permite al esquema de inteligencia artificial operar de forma autónoma.

Trabajos futuros deberán analizar las variaciones en los datos cuando se emplean sistemas de grabación distintos, y la capacidad de estos esquemas para aprender los rasgos característicos del entorno. Todo ello aun cuando pueda tratarse de los mismos modelos de los equipos, o el ambiente

sonoro pueda variar en función de la distribución espacial de las líneas de procesado en las canteras.

El análisis de las representaciones capturadas en estos modelos debe servirnos para desarrollar detectores especializados. Para esto será necesario evaluar la capacidad de los modelos para describir efectos o cambios que puedan representar anomalías en los sonidos. Estamos particularmente interesados en aquellos que, en última instancia, puedan ser asociados a desviaciones en el funcionamiento de los elementos de las líneas de producción, o que puedan ser buenos predictores de aquellos.

Este es el primer paso hacia el mantenimiento predictivo y automatizado en las canteras a través de registros sonoros. El sistema final deberá anticiparse a los fallos mecánicos y del funcionamiento, con una ventana temporal de predicción suficiente para ofrecer valor real a la industria. Todo ello deberá ser valorado a medida que se vayan completando los estudios necesarios, y se amplíe la base de información disponible.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado conjuntamente por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España dentro del proyecto PID2021-128469OB-I00, el Programa de Investigación e Innovación de la Unión Europea Horizon 2020 dentro del “Grant Agreement No. 101003750”.

Los autores agradecen expresamente la colaboración de las empresas operadoras de las canteras involucrados en este proyecto, así como a su personal técnico y humano por la colaboración prestada. En este caso a las canteras de HOLCIM-Piotello (Italia), por las pruebas preliminares realizadas allí en noviembre de 2022, HANSON-Valdilecha (España) y VICAT Granulats-Toulouse (Francia), por permitir el acceso a sus instalaciones y ayudar con las grabaciones de audio, en mayo y junio de 2023.

Los autores también quieren expresar su agradecimiento al Prof. José Eugenio Ortiz, por gestionar las grabaciones de audio en VICAT y liderar al equipo UPM-AI en DEQ, a los profesores María Josefa Herrero, Jose Ignacio Escavy e Iván Cabria, por su apoyo y participación en este proceso y en el desarrollo del servicio de Mantenimiento Predictivo. Finalmente, al científico Francisco Simón, del Consejo Superior de Investigadores Científicas, que facilitó el equipamiento para la primera captura de datos.

Finalmente, a la empresa Sigma Technologies y a su increíble equipo por organizar las visitas, coordinar y participar en el desarrollo de los servicios de IA DEQ: Pierre, Silvia, Javier, Cecilia, César.

9. REFERENCIAS

- [1] F.S.M. Araujo, I. Taborda-Llano, E.B. Nunes and R.M. Santos, "Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications," *Geosciences (Basel)*, vol. 12, pp. 319, Sep 1., 2022.
- [2] G.A. Blengini, E. Garbarino, S. Šolar, D.J. Shields, T. Hámor, R. Vinai and Z. Agioutantis, "Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa)," *Journal of Cleaner Production*, vol. 27, pp. 177-181, May. 2012.
- [3] M. Müller, C. Saulich, S. Schöneich and M. Schulze, "From competition to a sustainable raw materials diplomacy: Pointers for European policymakers," vol. 1/2023, 2023.
- [4] B.M. Beamon, "Designing the green supply chain," *Logistics Information Management*, vol. 12, pp. 332-342, Aug 1., 1999.
- [5] H. Pavolová, K. Čulková, Z. Šimková, A. Seňová and D. Kudelas, "Contribution of Mining Industry in Chosen EU Countries to the Sustainability Issues," *Sustainability (Basel, Switzerland)*, vol. 14, pp. 4177, Apr 1., 2022.
- [6] M. Sengupta, "Environmental Impacts of Mining," 2021.
- [7] G. Barakos, "Sustainable mining of critical minerals and metals around the world: bottlenecks and opportunities," *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 36, pp. 605-606, Oct 21., 2022.
- [8] F. Sánchez and P. Hartlieb, "Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation," *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 37, pp. 1385-1399, Oct 1., 2020.
- [9] A. Horvath, "Construction Materials and the Environment," *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 29, pp. 181-204, Jan 1., 2004.
- [10] P. Placino, "Informal mining labour: economic plurality and household survival strategies," Edward Elgar Publishing, 2020, pp. 179-185.
- [11] A. Young and P. Rogers, "A Review of Digital Transformation in Mining," *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 36, pp. 683-699, Aug 15., 2019.
- [12] Mason, Leah, Unger, Corinne, Lederwasch, Aleta, Rzian, Hala, Wynne, Laura, Giurco, Damien, Damien Giurco and Corinne Unger Eds., *Adapting to climate risks and extreme weather: A guide for mining and minerals industry professionals*, National Climate Change Adaptation Research Facility, 2013, .
- [13] J. Lee, H. Kao and S. Yang, "Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment," *Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 3-8, 2014.
- [14] L. Yang, G.E. Birhane, J. Zhu and J. Geng, "Mining Employees Safety and the Application of Information Technology in Coal Mining: Review," *Frontiers in Public Health*, vol. 9, pp. 709987, Aug 18., 2021.
- [15] DigiEcoQuarry Consortium, "DigiEcoQuarry," 2023.
- [16] J. Sottile and L.E. Holloway, "An overview of fault monitoring and diagnosis in mining equipment," *Tia*, vol. 30, pp. 1326-1332, Sep 1., 1994.
- [17] J. Qiu, B.B. Seth, S.Y. Liang and C. Zhang, "Damage Mechanics Approach for Bearing Lifetime Prognostics," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 16, pp. 817-829, Sep 1., 2002.
- [18] P. Nunes, J. Santos and E. Rocha, "Challenges in predictive maintenance – A review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 40, pp. 53-67, Feb. 2023.
- [19] G. Jombo and Y. Zhang, "Acoustic-Based Machine Condition Monitoring—Methods and Challenges," *Eng (Basel, Switzerland)*, vol. 4, pp. 47-79, Jan 1., 2023.
- [20] T.B. Duman, B. Bayram and G. İnce, "Acoustic Anomaly Detection Using Convolutional Autoencoders in Industrial Processes," *14th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2019)*, pp. 432-442, .
- [21] P.J. Pereira, G. Coelho, A. Ribeiro, L.M. Matos, E.C. Nunes, A. Ferreira, A. Pilastrri and P. Cortez, "Using Deep Autoencoders for In-vehicle Audio Anomaly Detection," *Procedia Computer Science*, vol. 192, pp. 298-307, 2021.
- [22] K. Khan, M. Sohaib, A. Rashid, S. Ali, H. Akbar, A. Basit and T. Ahmad, "Recent trends and challenges in predictive maintenance of aircraft's engine and hydraulic system," *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 43, Aug 1., 2021.
- [23] M. Onder, S. Onder and A. Mutlu, "Determination of noise induced hearing loss in mining: an application of hierarchical loglinear modelling," *Environ Monit Assess*, vol. 184, pp. 2443-2451, Apr 1., 2012.
- [24] S. Nandi, H.A. Toliyat and X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review," *Tec*, vol. 20, pp. 719-729, Dec 1., 2005.
- [25] B. Kroll, D. Schaffranek, S. Schriegel and O. Niggemann, "System modeling based on machine learning for anomaly detection and predictive maintenance in industrial plants," *Etf*, pp. 1-7, Sep. 2014.
- [26] K.K. Rachavarapu, Aakanksha, V. Sundaresha and R.A. N, "Localize to Binauralize: Audio Spatialization from Visual Sound Source Localization," *Iccv*, pp. 1910-1919, Oct. 2021.
- [27] M.J. Camara Largo and J.L. Blanco-Murillo, "Acercando los autocodificadores variacionales al gran público," *Revista De Acústica*, vol. 53, pp. 3-11, 2022.
- [28] M. Cámara and J.L. Blanco, "Phase-Aware Transformations in Variational Autoencoders for Audio Effects," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 70, pp. 731-741, Nov 2., 2022.
- [29] N. Devis, N. Demerlé, S. Nabi, D. Genova and P. Esling, "Continuous Descriptor-Based Control for Deep Audio Synthesis," pp. 1-5, 2023.



DESIGN OF A NOISE-SELECTIVE SOUND SEAT COMBINING AUDITORY SCENE ANALYSIS AND ACTIVE SOUND FIELD TECHNIQUES

*Alberto González Salvador¹, Manuel Rosa Zurera², María De Diego Antón¹,
Roberto Gil Pita^{2*}, Miguel Ferrer Contreras¹, Manuel Utrilla Manso²*

¹Universitat Politècnica de València, Valencia, España

²Universidad de Alcalá, Alcalá De Henares, España

RESUMEN

Se ha demostrado que la exposición prolongada a niveles elevados de ruido contribuye de forma significativa a diversos problemas de salud, como la discapacidad auditiva, la hipertensión y los trastornos del sueño. Además, los niveles elevados de ruido pueden exacerbar los niveles de estrés, aumentar la incidencia de accidentes laborales y fomentar comportamientos antisociales y agresivos.

Afortunadamente, estos problemas pueden aliviarse mediante la aplicación de técnicas de control activo del sonido, que consisten en manipular el entorno acústico utilizando altavoces para crear un campo sonoro deseado dentro de un área específica. Sin embargo, la integración de estas técnicas con el análisis de escenas auditivas basado en arrays plantea retos debido a las limitaciones físicas impuestas por la colocación de micrófonos y altavoces, que afectan al retardo máximo de procesamiento disponible para el sistema.

En este artículo se analiza el diseño de un asiento sonoro activo con selección de ruido, prestando especial atención a las limitaciones de diseño asociadas. El asiento propuesto combina el control activo del sonido con un amplio conjunto de técnicas derivadas del marco del Análisis Auditivo de Escenas. Estas técnicas permiten analizar mezclas de sonidos para separar fuentes sonoras individuales. Al analizar espacialmente la posición y las características de las distintas fuentes sonoras dentro de una sala, el asiento permite al usuario enmascarar selectivamente las fuentes sonoras no deseadas mediante técnicas de campo sonoro activo.

ABSTRACT

Prolonged exposure to elevated noise levels has been established as a significant contributing factor to various health problems, such as hearing impairment, hypertension, and sleep disturbance. Moreover, elevated noise levels can exacerbate stress levels, increase the incidence of workplace accidents, and foster anti-social and aggressive behaviors.

Thankfully, these issues can be alleviated through the implementation of active sound control techniques, which involves manipulating the acoustic environment by utilizing loudspeakers to create a desired sound field within a specific area. However, the integration of these techniques with array-based auditory scene analysis poses challenges due to physical limitations imposed by microphone and loudspeaker placement, which affect the maximum processing delay available for the system.

This paper analyzes the design of a noise-selective active sound seat, with a particular focus on the associated design constraints. The proposed seat combines active sound control with a comprehensive set of techniques derived from the Auditory Scene Analysis framework. These techniques enable the analysis of sound mixtures to separate individual sound sources. By spatially analyzing the position and characteristics of different sound sources within a room, the seat empowers the user to selectively mask undesirable sound sources using active sound field techniques.

Keywords/Palabras Clave— Active Noise Cancellation, Least Mean Squares Beamforming, Sound Seat.

* **Corresponding author / Autor de contacto:** roberto.gil@uah.es

Acknowledgements: This work has been funded by the Spanish Ministry of Science and Innovation with projects PDC2022-133651-C21 and PDC2022-133651-C22 (both funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and European Union NextGenerationEU/PRTR); by MICIN under grant PID2021-125736OB-I00 (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/, “ERDF A way of making Europe”); by GVA under grant CIPROM/2022/20; by the Spanish Ministry of Science and Innovation with project PID2021-129043OB-I00 (MSI/FEDER); and by the Community of Madrid and the University of Alcalá under project EPU-INV/2020/003.

Copyright: ©2023 Alberto González Salvador et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCTION

Active sound control (ASC) is the process of manipulating a sound field using electroacoustic transducers, typically loudspeakers, for the purpose of creating a desired sound field into a spatial zone. It can be used for canceling noise (ANC) [1], reshaping sound field [2], spatial audio reproduction [3], sound quality improvement [4], and others. Adaptive algorithms and methods are commonly used [1], although even machine learning techniques have been tested [5]. Currently, most of the efforts in ANC are focused on improving the performance of adaptive strategies customized to ANC, considering both linear controllers [6] and non-linear ones [7]. Thus, many algorithms to improve the convergence speed and tracking capability [8], the robustness [9], or the computational cost [10] have been proposed. In addition, control strategies particularized to the noise signal characteristics have also been extensively studied, for tonal or periodic noises [11] (typical in engines or revolution machines). Active Noise Equalization techniques (ANE) are used to keep a desired residue of the noise signal, instead of ANC. ANE can be used for narrowband noise (the most usual cases) [11, 12] or broadband noise [13, 14].

Most of these strategies require multichannel versions to extend control over a wider area of space, so most algorithms are proposed in their multichannel extension. These multichannel versions are high-computationally demanding when run on a centralized system, so decentralized strategies [15,16] and collaborative distributed algorithms [17,18] are being proposed. There are a variety of practical noise control problems currently addressed using active technologies, such as noise canceling headphones, and the control of: propeller induced noise in aircraft, noise in helicopters, and both engine and road noise in the automotive industry.

ANC can be complemented with the use of Auditory Scene Analysis (ASA) techniques. ASA consists in the analysis of sound mixtures to obtain objects corresponding to individual sound sources [19]. So, using information received by a set of microphones or array of microphones, ASA techniques aim at locating the different sound sources [20], classifying the typology of the sound source [21], and separating the sound received by this source from the possible interferent sounds present in the scene [22].

With this idea in mind, this paper studies the combination of these two big research fields: ANC and sound source separation, to propose a noise-selective sound seat. An array of microphones will select and separate the noisy sources, and two control speakers will apply a noise cancellation process, creating two spatial bubbles ideally placed on the ears of the subject, so that the person placed in the seat does not perceive the noise source, while maintaining the integrity of the desired sound sources.

The research is structured as follows: first, the basic concepts of ANC and array beamforming are presented. Then, the particularities of the proposed design are exposed.

The paper then presents the results and conclusions derived from the experiments.

2. MATERIALS AND METHODS

The main sound seat system proposed in this paper is composed of two main subsystems, developed respectively at the Technical University of Valencia, and at the University of Alcalá. The first subsystem includes the development of algorithms for ANC, while the second one focuses on the development of algorithms for sound detection, location, and separation. The collaboration of both subsystems leads to the proposal of a system that combines an adaptive noise control subsystem with another system to generate knowledge of the acoustic scene, whose proof of concept is the objective of this paper.

2.1. Active Noise Cancellation

The basic idea of ANC originated in 1936. In summary, an ANC system consists in measuring the noise sound field with microphones, manipulating the resulting signal, and then feeding it to an electroacoustic secondary source, i.e., a loudspeaker, to produce an acoustic wave that attenuates the noise sound field at low frequencies. During the last four decades, much research effort has been devoted to understanding and solving most of the complexities that arise when implementing such an apparent system. These research efforts have made possible the implementation of useful ANC systems with application in different sectors of industry.

Possibly, the first practical application of an ANC system was aimed at attenuating the level of noise that traumatized pilots of fighter planes during military conflicts. Due to a lack of technology, the implementation of this ANC system could only be undertaken for luxury aircrafts and cars. However, the rapid development of inexpensive processors with advanced digital signal processing (DSP) capabilities has recently allowed large-scale commercialization of these systems for a vast number of applications. For the applications where ambient noise needs to be suppressed, the use of ANC systems for headset has become very popular. This is for instance the ANC system used by several flight companies to ensure the auditory comfort of passengers, who are generally seated for significant lengths of time and subjected to high ambient noise levels.

More recently, to remove the need of using headsets, several companies have already developed a cutting-edge technology that employs a set of loudspeakers and microphones when creating quiet bubbles where the ambient noise is attenuated. This technology can operate in a multi-user setting where multiple stand-alone and non-interacting ANCs can be simultaneously operating to create multiple quiet bubbles in the same room or hall, one per user. However, it suffers strong performance degradation if ANCs of different users are acoustically coupled, i.e., the signals



Figure 1. Car seats surrounded by sound transducers and microphones.

emitted by the loudspeaker of one local ANC are recorded by the microphones of another ANC. Moreover, due its non-cooperative nature, this technology does not leverage the spatial diversity of the signals to be acquired with microphones of the different ANCs to obtain a better cancellation of the noise within the different quiet bubbles of a multi-user setting. Finally, the solutions available in the market usually pursue maximal attenuation of all surrounding unwanted noise.

However, in some applications, instead of an ANC it is desirable to implement an ANE that retains a noise signal with a low level of power and a specified spectral shape. For instance, in a car or a truck, unlike the passengers, the driver needs some audible information about the engine speed to be able to control the vehicle safely. Therefore, adding a modern smart audition system to an ANC system will give an innovative noise selective ANE, whose noise target can be defined by each user depending on his needs or preferences.

2.1. Auditory Scene Analysis using a microphone array: sound source separation

As was stated above, the implementation of ANC solutions in a sound seat has already been carried out in the literature, but the problem of combining it with array-based sound source separation techniques has not been properly addressed.

Sound separation is a fundamental challenge in audio signal processing, aiming to extract specific sound sources from a mixture of acoustic signals. In recent years, beamforming techniques, especially when coupled with linear microphone arrays, have emerged as powerful tools for enhancing the separation of sound sources in various applications. This paper explores the principles and applications of sound separation using beamforming and linear microphone arrays.

Beamforming is a signal processing technique used to spatially filter acoustic signals received by an array of microphones, focusing on a particular direction while attenuating sounds from other directions. In essence, it creates a “beam” of enhanced sensitivity towards the desired source location. Beamforming algorithms exploit the spatial differences in arrival times and phases of sound waves at different microphones to enhance or attenuate signals, resulting in improved signal quality.

Linear microphone arrays consist of multiple microphones arranged in a linear fashion. The spatial arrangement of the microphones allows for precise control over the beamforming process. Each microphone captures a slightly different version of the incoming sound due to its location, enabling the system to differentiate between various sources based on their spatial characteristics.

3. DESCRIPTION OF THE PROPOSAL

The system proposed in this paper combines an ANC algorithm with a microphone linear array based beamformer technique, aiming at developing a highly innovative active sound seat, which can be eventually replicated and connected within a network. This sound seat simultaneously ensures the auditory comfort of multiple users located in different positions of a room by creating acoustically comfortable bubbles where the noise perceived by each user is selected and/or equalized according to some user-defined preferences.

This proof of concept is aimed at integrating and testing a novel knowledge-based listening and reproduction system for located listeners without the need of using headsets. This system, which we call active sound seat, is formed by two main parts: a knowledge-based listening module (KLM) and an active noise controller (ANC). Both subsystems interact to provide a personalized and pleasant acoustic environment to the listener, reducing user-selected undesired noises while keeping desired sounds (music, alarms, information, etc.). Furthermore, the system will provide information about the ambient sound and can be used within a collaborative network of active sound seats. By doing so, the proposed system can simultaneously ensure the auditory comfort of multiple users that are regularly exposed to high noise levels. The system can work in dynamic environments where the sound sources change or move.

Figure 1 shows the distribution of the microphones and speakers in the room, displaying the position of the noise and the desired source (red asterisk, 1 and 2 respectively), the position of the microphones in the linear array used to implement the KLM (black circles, 1 to 6), the position of the control mics where the space bubbles will be placed (blue circles, 7 and 8), and the position of the control speakers of the ANC (blue asterisk, 3 and 4). Please note that the separation between the 6 mics in the array (0.2 m between microphones) has been selected so that no aliasing is going to be present with signals under 850 Hz. Table 1 shows the coordinates of the different elements.

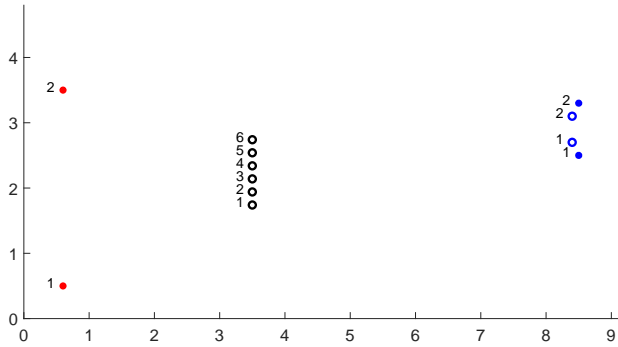


Figure 1. Room configuration displaying the position of the noise and the desired source (red asterisk, 1 and 2 respectively), the position of the microphone array (black circles, 1 to 6), the position of the control mics (blue circles, 7 and 8), and the position of the control speakers (blue asterisk, 3 and 4).

Table 1. Spatial coordinates of the microphones and speakers.

	x (m)	y (m)	z (m)
Source 1 (noise source)	0.60	0.50	1.50
Source 2 (speech source)	0.60	3.50	1.50
Control Speaker 1	8.50	2.50	1.50
Control Speaker 2	8.50	3.30	1.50
Control Mic 1	8.40	2.70	1.50
Control Mic 2	8.40	3.10	1.50
Array Mic 1	3.50	1.74	1.50
Array Mic 2	3.50	1.94	1.50
Array Mic 3	3.50	2.14	1.50
Array Mic 4	3.50	2.34	1.50
Array Mic 5	3.50	2.54	1.50
Array Mic 6	3.50	2.74	1.50

The ANC algorithm used in this paper is based on the Frequency Domain Adaptive Filter algorithm (FDFA) [23]. This algorithm is designed to implement an adaptive finite impulse response (FIR) filter within the frequency domain using the fast block least mean squares (LMS) algorithm. This implementation allows for greater efficiency and control over filtering operations. Key parameters for this block include filter length and block length, which define the filter's length and the block size utilized by the algorithm.

The frequency-domain adaptive filtering process entails three essential steps: filtering, error estimation, and tap-weight adaptation. This algorithm performs FIR filtering within the frequency domain employing either the overlap-save or overlap-add method. Both error estimation and tap-weight adaptation are executed using the LMS algorithm, contributing to the algorithm's efficiency and adaptability.

Concerning the KLM, in this paper, a Filter-And-Sum beamformer (FASB) [24] is applied to separate the “desired”

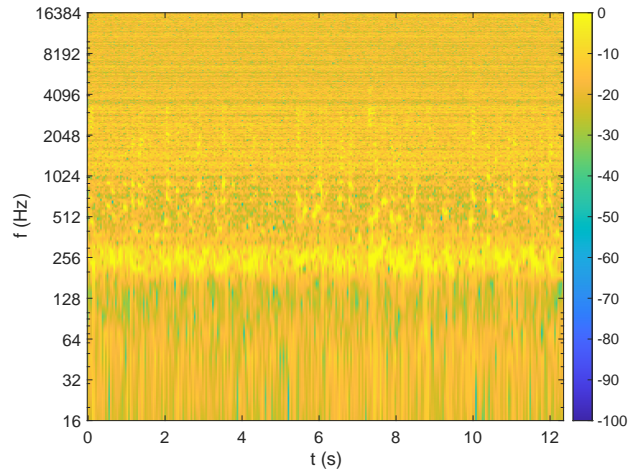


Figure 2. Reference mix in control microphone 1 without ANC.

noise source from the rest of the sound sources present in the acoustic scene. In this algorithm, the signals received in each of the microphones in the array are filtered and then summed to obtain the separated noise reference, that will posteriorly be used by the ANC subsystem. In a design stage, the coefficients of the filter can be obtained by a LMS process, where the objective/target is the isolated noise signal received in the control microphones that are placed in the positions where the ANC want to be effective, typically close to the ears of the subject.

One important fact to take into consideration when designing an ANC system that includes real-time estimation of the desired noise source is the delay and available computing time. Due to the physicality of the proposal, the time difference that takes between the noise sound arriving at the microphone array and the same noise arriving at the control microphones must be larger than the processing time. That is, if we want to transmit a cancellation signal from our control speakers, we must ensure that this signal arrives at the same time as the noise to be removed. This fact strongly conditions the time requirements of both the ANC subsystem and the KLM subsystem, so that the total processing time (including buffers, signal acquisition and processing) must be lower or equal to the time it takes the sound to travel from the array to the chair. This is not an easy issue, and it forces the time processing frames to be shorter.

4. EXPERIMENTS AND RESULTS

To carry out the experiments, two sound sources have been artificially mixed. First, the impulse response of each microphone-speaker pair has been estimated using an ODEON software with a sampling frequency of $f_s=48000$ Hz, a room of 9.13m x 4.80m x 2.64m, and a reverberation

Table 2. Results of the source separation in terms of SNR (dB), in the case of introducing two sequences of white Gaussian noise in the two sources, plus an uncorrelated ambient noise of about 20 dB of SNR in the microphones.

	Ctrl Mic 1	Ctrl Mic 2
SNR (dB) of the KLM	14.97 dB	14.94 dB

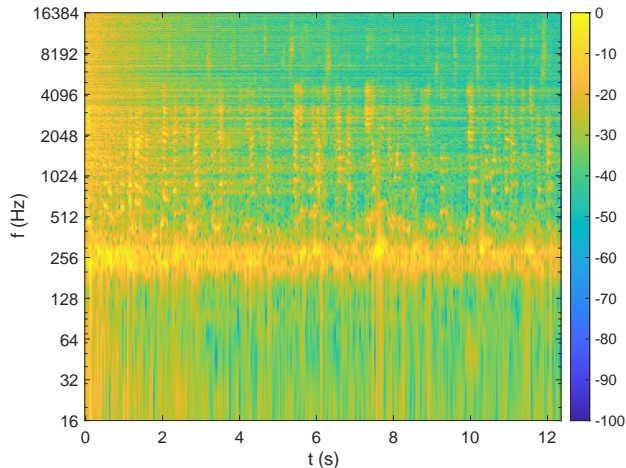


Figure 3. ANC using the isolated noise in array mic 1.

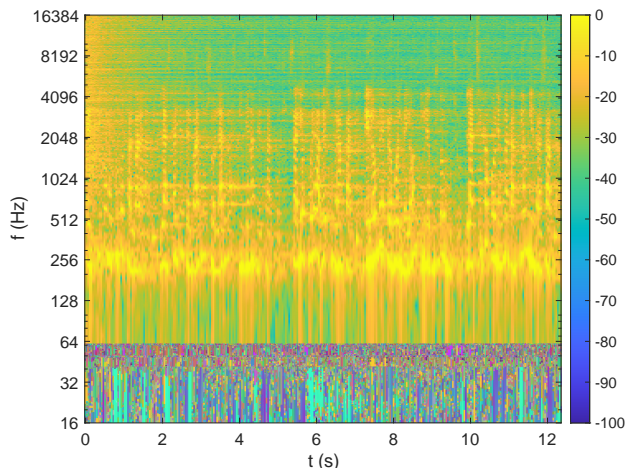


Figure 4. Combining ANC with sound source separation.

time of $RT60=0.2s$. Then, these impulse responses have been used to generate a mixture of two sound sources:

- The first source is a gaussian noise source, low pass filtered to contain all the energy below 850 Hz. This will be the “desired” noise source that must be removed in the spatial sound bubbles. This source will be placed in the position of the first source speaker.
- The second source is a speech from a female speaker. It will be placed in the position of the second source speaker.

Figure 2 shows the spectrogram of the mixed signals received by the first control microphone.

Once the two sources are artificially mixed, the KLM subsystem is implemented, to obtain the estimation of the noise sourced that should be received in each of the control microphones. Please note here that the information from these control microphones is not used in this process, they are only used to estimate the coefficients of the filters of the FASB.

So, the KLM subsystem obtains an estimation of the signals in the control microphones (those placed in the desired spatial bubbles). The obtained signal is estimated with an earliness of 380 samples. These 380 samples would be the margin of samples to be able to implement both the ANC and the acquisition delay of the system. As a reference, a standard nowadays Firewire low-delay audio card has an in-to-out delay of 70 samples, so the remaining 310 samples can be used to implement the ANC subsystem.

Table 2 shows the results of the sound source separation algorithm in terms of Signal-to-Noise Ratio (SNR). This SNR values have been measured at the control microphones 1 and 2. As we can see, we obtain an SNR of about 15 dB in each of the two estimates (estimate for control microphone 1 and for control microphone 2), in the case of introducing two sequences of white Gaussian noise in the two sources, plus an uncorrelated ambient noise of about 20 dB of SNR in the microphones.

These two estimated noise signals are then used to feed the ANC algorithm, and to implement the FDFA, obtaining the signals that must be reproduced by the control speakers, so that the effect of the noise is cancelled in the position of the sound bubbles (that is, in the position of the control microphones). Figure 4 shows the spectrogram of the signal received in the first control microphone, where the effect of the low frequency noise source has been mitigated.

For comparison purposes, Figure 3 shows the spectrogram of the results that could be obtained by the ANC in case a perfect noise signal were available. Comparing figures 3 and 4 we can appreciate the similarity of the ANC performance when the noise is estimated perfectly (ideal KLM), and in a real case noise estimation (real KLM).

5. CONCLUSIONS

Combining sound separation using beamforming and active noise cancellation has revolutionized our ability to isolate and extract specific sound sources from complex acoustic environments. The proposed seat combines active sound control with a comprehensive set of techniques derived from the Auditory Scene Analysis framework. These techniques enable the analysis of sound mixtures to separate individual sound sources. By spatially analyzing the position and characteristics of different sound sources within a room, the seat empowers the user to selectively mask undesirable sound sources using active sound field techniques.

6. BIBLIOGRAPHY

- [1] P.A. Nelson, S, J. Elliott, "Active control of sound". Academic press, 1991.
- [2] F. Rumsey, "Sound field control", Journal of the AES, vol. 61, no. 12, pp. 1046–1050, 2013.
- [3] J. Francombe, T. Brookes, R. Mason, J. Woodcock, "Evaluation of Spatial Audio Reproduction Methods (Part 2): Analysis of Listener Preference", Journal of the AES, vol. 65, pp. 212-225, 2017.
- [4] J. Jiguang, L. Yun, "Review of active noise control techniques with emphasis on sound quality enhancement", Applied Acoustics, vol. 136, pp. 139-148, 2018.
- [5] Z. Hao, W. DeLiang, "Deep ANC: A deep learning approach to active noise control", Neural Networks, vol. 141, pp. 1-10, 2021.
- [6] L. Lu, K. L. Yin, R. C. de Lamare, Z. Zheng, Y. Yu, X. Yang, B. Chen, "A survey on active noise control in the past decade–Part I: Linear systems", Signal Processing, vol. 181, 2021.
- [7] L. Lu, K. L. Yin, R. C. de Lamare, Z. Zheng, Y. Yu, X. Yang, B. Chen, "A survey on active noise control in the past decade–Part II: Nonlinear systems", Signal Processing, vol. 181, 2021.
- [8] D. Shi, W. S. Gan, B. Lam and K. Ooi, "Fast Adaptive Active Noise Control Based on Modified Model-Agnostic Meta-Learning Algorithm", IEEE Signal Processing Letters, vol. 28, pp. 593-597, 2021.
- [9] A. Mirza, A. Zeb, S.A. Sheikh, "Robust adaptive algorithm for active control of impulsive noise", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 44, 2016.
- [10] J. Fabry, S. Liebich, P. Vary and P. Jax, "Active Noise Control with Reduced-Complexity Kalman Filter" 16th International Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC), pp. 166-170, 2018.
- [11] S.M. Kuo, D.R. Morgan, "Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementation", New York, NY, USA: Wiley, 1996.
- [12] J. Estreder, G. Piñero, M. Ferrer, M. de Diego, A. Gonzalez, "Perceptual Active Equalization of Multi-Frequency Noise", 18th International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications (SIGMAP), "Best Paper Award", 6-8 July 2021.
- [13] S.M. Kuo, Y. Yang, "Broadband adaptive noise equalizer", IEEE Signal Processing Letters, vol. 3, no. 8, pp. 234-235, Aug. 1996.
- [14] S.M. Kuo, J. Tsai. Residual noise shaping technique for active noise control systems, The Journal of the Acoustical Society of America, 95(3): 1665-1668, 1994.
- [15] S. Pradhan, G. Zhang, X. Qiu, "A time domain decentralized algorithm for two channel active noise control", J. of the Acoustical Society of America, vol. 147, pp. 3808-3813, 2020.
- [16] M. Ferrer, M. de Diego, G. Piñero and A. Gonzalez, "Affine Projection Algorithm Over Acoustic Sensor Networks for Active Noise Control," IEEE/ACM Trans. on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 29, pp. 448-461, 2021.
- [17] C.G. Lopes and A. H. Sayed, "Distributed processing over adaptive networks", Proc. Adaptive Sensor Array Processing Workshop, MIT Lincoln Lab., Lexington, MA, June 2006.
- [18] V. Molés-Cases, S. Elliott, J. Cheer, G. Piñero, and A. Gonzalez, "Weighted pressure matching with windowed targets for personal sound zones", J. of the Acoustical Society of America 151, Online, 2022.
- [19] A.S. Bregman, "Auditory scene analysis: the perceptual organization of sound." Cambridge, MA: MIT Press, 1990.
- [20] M. Rosa-Zurera, M. Utrilla-Manso, R. Gil-Pita, J. García-Gómez, "Analysis of error in sound sources position estimation with microphone arrays", 2021 Signal Processing Symposium (SPSymo), pp. 232-237, Warsaw, September 2021.
- [21] M. Bautista-Durán, J. García-Gómez, R. Gil-Pita, I. Mohíno-Herranz, M. Rosa-Zurera, "Energy-Efficient Acoustic Violence Detector for Smart Cities". Int. Journal of Computational Intelligence Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 49–56, 2017.
- [22] D. Ayllón, R. Gil-Pita, and M. Rosa-Zurera. "Rate-constrained source separation for speech enhancement in wireless-communicated binaural hearing aids", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 1, pp. 1-14, 2013.
- [23] Farhang-Boroujeny, B., Adaptive Filters: Theory and Applications, Chichester, England, Wiley, 1998.
- [24] M. Kajala and M. Hamalainen, "Filter-and-sum beamformer with adjustable filter characteristics," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), Salt Lake City, UT, USA, pp. 2917-2920 vol.5, 2001.



DESARROLLO DE SENSORES INTELIGENTES BASADOS EN FENÓMENOS VIBRO-ACÚSTICOS

Cesar Asensio Rivera², Ignacio Pavón García¹, Juan Manuel López Navarro², Guillermo de Arcas Castro^{1*}

¹Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

²Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETSI Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

El desarrollo de sensores inteligentes basados en el análisis de señales vibro-acústicas ha sufrido una fuerte evolución en las últimas décadas, encontrando aplicación en sectores tan diferentes como la energía, el transporte, la monitorización de procesos industriales, el medioambiente o la salud, entre otros. En muchas ocasiones este tipo de soluciones se basan en el empleo de diferentes técnicas de inteligencia artificial que permiten alcanzar resultados muy atractivos, al menos a priori, pero que también plantean algunas preguntas sobre las que conviene reflexionar ¿Hasta qué punto los resultados obtenidos son generalizables? ¿Qué consideraciones se deben tener en cuenta desde el punto de vista de la implementación en dispositivos de propósito específico? ¿Debemos conformarnos con alcanzar buenos resultados en las métricas de evaluación, o estas soluciones deberían ayudarnos también a mejorar nuestro conocimiento sobre los procesos que están modelando? Estas son algunas de las preguntas que se pretende abordar en este trabajo a través de la revisión de algunos trabajos en los que han participado los autores en los últimos años.

ABSTRACT

The development of intelligent sensors based on the analysis of vibro-acoustic signals has increased significantly in recent years, finding application in sectors as different as energy, transportation, monitoring of industrial processes, the environment or health, among others. In many cases, these solutions are based on the use of different artificial intelligence techniques that allow us to achieve very attractive results, at least a priori, but they also raise some concerns. To what extent are the results obtained generalizable? What considerations should be taken into account from the point of view of their implementation in specific devices and when? Is it enough to achieve good results in the evaluation metrics, or should these solutions

also help us to improve our knowledge about the processes that they are modeling? These are some of the questions that this work aims to address through the review of some works in which the authors have participated in recent years.

Palabras Clave— sensores inteligentes, inteligencia artificial, tratamiento digital de la señal, instrumentación.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han producido una serie de cambios tecnológicos que han propiciado un aumento importante en el desarrollo de lo que podríamos denominar sensores inteligentes. Entendemos como tales, aquellos sensores que incluyen no sólo la función de transducción para la que han sido diseñados, sino también el procesamiento de las señales de salida para obtener mejores prestaciones o incluso para desarrollar nuevas funcionalidades. Dentro de este tipo de soluciones, toman especial relevancia para este congreso aquellas basadas en fenómenos vibro-acústicos, y que por tanto persiguen el desarrollo de nuevas aplicaciones basadas en el análisis de señales procedentes de micrófonos, acelerómetros, o cualquier otro tipo de transductor sensible a dichos fenómenos.

El desarrollo de este tipo de aplicaciones ha sido una de las líneas de investigación en las que han venido trabajando los autores de este trabajo en el Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada de la Universidad Politécnica de Madrid. En este artículo se presentan tres ejemplos de investigaciones desarrolladas en tres sectores diferentes (transporte, industria y salud) que sirven de base para plantear algunas reflexiones sobre el desarrollo de este tipo de soluciones.

2. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE ASFALTO SECO/MOJADO EN VEHÍCULOS

La incorporación de dispositivos electrónicos en el automóvil ha contribuido de forma importante a mejorar la seguridad y

* **Autor de contacto:** primer.autor@miemail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

el confort, con relevantes contribuciones tanto en sistemas de seguridad activa como de asistencia a la conducción. En esta investigación (1) se desarrolló un sistema de discriminación del estado de la carretera (seco/mojado) basada en el análisis del ruido de rodadura generado durante la conducción.

El sistema se desarrolló en tres fases: en primer lugar se realizó una prueba de concepto utilizando una integración basada en instrumentación modular embarcada en un vehículo automóvil para demostrar la viabilidad de la solución. A continuación, se diseñó un prototipo funcional basado en un procesador digital de la señal con capacidad para analizar y detectar los cambios en el asfalto en tiempo real, y finalmente tras realizar varias optimizaciones se desarrolló un prototipo industrializable basado en un microcontrolador que permite la integración con las ECU del vehículo para obtener datos capturados por los sensores del mismo y enviar las estimaciones del estado del firme.

El sistema de detección se basa en un clasificador basado en máquinas de vectores soporte (SVM), desarrollado y evaluado utilizando Matlab y que proporciona tasas de aciertos aceptables (de más del 90%). El sistema se basa en el principio de que la huella acústica de ruido de rodadura generada por la interacción rueda asfalto difiere dependiendo del estado del firme. Por tanto, en primer lugar se utiliza un micrófono para capturar el ruido de rodadura, y como se pretende que el sistema se pueda realizar con elementos de bajo coste se impone el uso de un micrófono de tipo electrec, en concreto el modelo WM-63PR de Panasonic, que cumple con los requisitos de sensibilidad, relación señal a ruido y respuesta en frecuencia.

En segundo lugar se digitaliza la señal y se extrae el conjunto de características con el que se entrena el clasificador. Estas se obtuvieron a partir de los 30 valores de la potencia en bandas de tercio de octava normalizadas aplicando técnicas de reducción de características. Tras evaluar las prestaciones para diferentes configuraciones en la fase de optimización del prototipo final se eligió una configuración con 4 características, que es capaz de proporcionar prestaciones razonables minimizando los requisitos del sistema de procesamiento de la señal, y por tanto permitiendo utilizar un sistema más sencillo, y además reducir su consumo (2) (3).

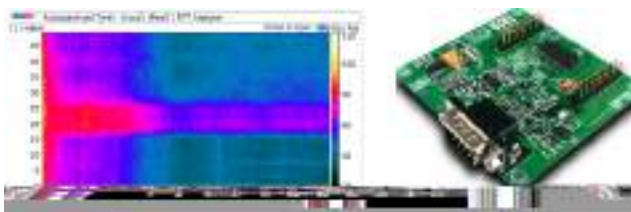


Figura 1. Sistema de detección del estado del asfalto: principio de funcionamiento y aspecto del prototipo industrializado y patentado.

3. MONITORIZACIÓN NO INVASIVO EN PROCESOS DE MECANIZADO

Se estima que las operaciones de mecanizado representan alrededor del 5% del PIB de los países desarrollados (4). Si bien el nivel de automatización en este tipo de sistemas es muy elevado, existen aún numerosos retos en la monitorización y modelización de dichos procesos. Un ejemplo, es el sistema de monitorización no invasiva desarrollado en esta investigación (5) para monitorizar operaciones de fresado periférico, utilizadas habitualmente tanto en operaciones de mecanizado como de acabado. En dicho trabajo se compara un desarrollo basado en técnicas tradicionales de modelado del proceso y el análisis mediante técnicas de tratamiento digital de la señal (6), con otro basado en técnicas de modelado basado en datos (7).

En el primer caso el sistema se basa en un modelo geométrico del proceso de mecanizado (8) desarrollado en el Laboratorio de Fabricación de la ETSI Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid que permite calcular la profundidad de corte en un proceso de fresado a partir del ángulo de proyección, el periodo de rotación de la herramienta y su diámetro. El ángulo de proyección de la herramienta se calcula a partir de los tiempos de entrada y salida de la misma, obtenidos a partir del análisis de la señal de ruido aéreo captada por un micrófono.

La parte superior de la figura 2 muestra un esquema del montaje utilizado durante los experimentos, y en la parte intermedia se muestra el diagrama del algoritmo desarrollado. El sensor incluye una pequeña etapa de acondicionamiento encargada de maximizar el margen dinámico y reducir el ruido. Posteriormente, una tarjeta de adquisición de alta resolución digitaliza la señal para su posterior filtrado siguiendo el esquema descrito en la figura. El algoritmo consiste en un filtro adaptativo (etapa 2) que toma como referencia una señal sintética generada a partir del modelo del proceso alimentado por los parámetros que se conocen del mismo (1). El filtro permite mejorar la relación señal ruido lo suficiente como para poder extraer los tiempos de entrada y salida de la herramienta, y finalmente calcular la profundidad de corte utilizando el modelo descrito anteriormente. Los resultados obtenidos se compararon con los de un sistema basado en un dinamómetro repitiendo los ensayos varias veces para valores de la profundidad de corte entre 2 y 10 mm, obteniendo una desviación máxima respecto al valor del dinamómetro del 0,5% para $a_p=2\text{mm}$, y una varianza entorno al doble ($64\mu\text{m}@a_p=8$ respecto a $31\mu\text{m}$ del dinamómetro).



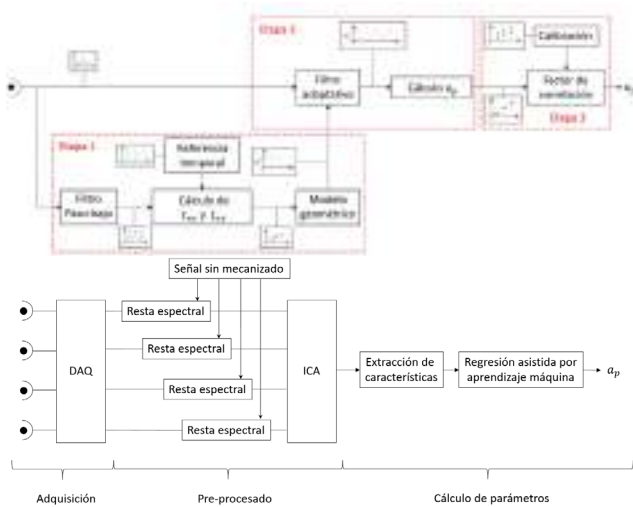


Figura 2. Sistema de monitorización no invasivo para operaciones de fresado periférico en procesos de mecanizado.

El segundo desarrollo tenía como objetivo disminuir la varianza de las estimaciones y para ello se combinó un sistema multicanal de 4 micrófonos con técnicas de modelado basado en datos asistidas por algoritmos de inteligencia artificial según se muestra en la parte inferior de la figura 2. El algoritmo comienza aplicando una resta espectral a partir de una señal de referencia registrada cuando la herramienta está girando en vacío junto con un análisis de componentes independientes (ICA) para intentar extraer la señal de mecanizado. A partir de ahí se extrae un conjunto de características para entrenar un modelo de regresión asistido por aprendizaje máquina. En concreto se extraen 19 características de cada ventana temporal: 6 primeros armónicos de la transformada de Fourier, potencia en 4 bandas de tercios de octava, pendiente, flujo y punto de caída espectral, centroide, pitch, valor eficaz, planitud y dispersión espectral y entropía. Los resultados obtenidos muestran una buena precisión en términos del error absoluto, mostrando un error medio de un 1% para valores de la profundidad de corte por encima de 1mm. Los resultados aportados por el dinamómetro asistido por aprendizaje máquina presentan una dispersión sensiblemente menor que por el método analítico, pero el modelo de regresión empleado está limitado a trabajar dentro de los parámetros con los que ha sido entrenado, siendo necesario re-entrenar con nuevos valores para poder trabajar fuera de esos límites. En ambos casos esta prueba de concepto demuestra que es posible monitorizar este tipo de procesos a partir de la señal de ruido generada por la interacción entre la herramienta y la pieza a mecanizar, si bien es cierto que aún se deben dar muchos pasos para su posible industrialización.

4. SEGUIMIENTO DE SÍNTOMAS MOTORES EN LA ENFERMEDAD DE PARKINSON

La salud es otro de los campos de aplicación importante de este tipo de soluciones, como por ejemplo demuestran la gran cantidad de estudios publicados orientados a desarrollar sistemas de asistencia al diagnóstico de diferentes patologías basados en el análisis de voz, o las numerosas aplicaciones que se están desarrollando basándose en el análisis de las señales obtenidas a partir de métodos de imagen por ultrasonidos. Sin embargo, en esta tercera investigación (9) nos centramos en analizar la posibilidad de utilizar los sensores inerciales de relojes o pulseras inteligentes comerciales para analizar los síntomas motores de enfermos de Parkinson. Esta es la segunda enfermedad de tipo neurodegenerativo por prevalencia, y su gestión clínica presenta numerosos retos actualmente, tanto desde el punto de vista de los tratamientos, como de su diagnóstico y seguimiento.

El sistema, cuyo esquema se resume en la figura 3, se basa en analizar las señales de los acelerómetros de un reloj inteligente cuando el paciente realiza una serie de ejercicios guiados. Estos ejercicios están extraídos de las escalas de valoración clínica que utilizan los neurólogos y han sido diseñados para evaluar diferentes síntomas, como el nivel de temblor, la lentitud de movimiento, o la presencia de movimientos involuntarios. En su desarrollo se combinaron tanto datos experimentales obtenidos por los autores durante la investigación, así como los que habían publicado otros autores. Para ello en primer lugar se desarrolló un sistema de recolección de datos denominado Monipar y se caracterizaron los dispositivos a utilizar (10). Posteriormente se desarrollaron diferentes algoritmos para la detección o clasificación de cada síntoma mediante combinando técnicas de procesamiento digital para la extracción de características y algoritmos de aprendizaje automático y profundo para las tareas de clasificación (11) (12) (13).



Figura 3. Sistema para el seguimiento de síntomas motores en la enfermedad de Parkinson

Esta metodología también se ha aplicado en otros campos como la detección automática del tipo de herramientas para estudios de seguridad laboral (14) y actualmente se está aplicando para el reconocimiento de la actividad humana.

5. CONCLUSIONES

En los trabajos anteriores se han descrito diferentes desarrollos que combinan tanto técnicas tradicionales de modelado de sistemas y de tratamiento digital de la señal, como soluciones basadas en técnicas de aprendizaje automático y profundo. Los ejemplos también muestran investigaciones en diferentes fases de madurez tecnológica, incluyendo desde pruebas de concepto a dispositivos industrializados preparados para integrarse en sistemas comerciales en funcionamiento.

En concreto, en el primer ejemplo se muestra el desarrollo de una solución que cubre todas las etapas desde la prueba de concepto al desarrollo del prototipo industrializable. Lógicamente las tecnologías utilizadas en cada una de estas etapas son diferentes, puesto que el esfuerzo en cada una de ellas debe concentrarse en los objetivos a cubrir en cada fase. En ese sentido, los sistemas de instrumentación abiertos, que permiten integrar diferentes módulos hardware en sistemas compactos a la vez que proporcionan fuertes capacidades de análisis de datos y comunicaciones son ideales para las primeras fases de prototipado debido a su flexibilidad y a la rapidez que ofrecen para poner en marcha un sistema de experimentación. En estas fases la adquisición de datos es el punto crítico, ya que en general el análisis se realizará fuera de línea (offline) e incluso los sensores podrán evolucionar en función de los resultados que obtengan durante la experimentación, como por ejemplo sucedió en el segundo ejemplo mostrado.

Otra cuestión importante en estos ejemplos es la diferencia de metodologías. En el primer caso desde el principio se tenía claro que modelar un sistema de detección de este tipo utilizando sensores de bajo coste y teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones reales en las que debería funcionar mediante técnicas de modelado tradicional sería complejo. Además, el objetivo era poder llegar a obtener un sensor de bajo coste lo que obligaba a priorizar desde el inicio aquellas alternativas que presentasen menor coste computacional, como por ejemplo las máquinas de vectores soporte. Sin embargo, en el segundo caso la situación es completamente opuesta. El proceso que se quiere modelar es bien conocido y se caracterizado a través de múltiples investigaciones previas, por lo que es más una cuestión de innovación que de investigación. Se trata de ver si se puede capturar la energía que genera un proceso de mecanizado con un micrófono en vez de un dinamómetro y obtener estimaciones de un grado de precisión similar. Por este motivo en primer lugar se desarrolla una solución basada en técnicas de tratamiento digital de señal y el modelo analítico

del proceso, de forma que se facilita la comparación directa entre la solución acústica y la existente. Este desarrollo además invita a profundizar en el conocimiento del proceso, lo cual tiene un valor importante que no debe perderse de vista, y así se pone de manifiesto en el segundo desarrollo cuando se utilizan técnicas de regresión asistidas por aprendizaje máquina. De entre todas las opciones posibles se priorizó el uso de técnicas que incluyesen la definición y extracción de características y para intentar mejorar la explicabilidad del modelo. Si bien los resultados obtenidos en cuanto a la precisión del sistema son ligeramente superiores, el sistema basado en inteligencia artificial adolece de un cierto efecto de caja negra que nos aleja en cierta manera del proceso bajo estudio. Desde luego hay mucho margen para mejorar la solución desarrollada, que en este caso aún está en la fase de prueba de concepto, pero es un ejemplo que quizás permite ver fácilmente la importancia de utilizar técnicas que aporten no sólo prestaciones sino también conocimiento.

El tercer ejemplo también presenta una investigación en fase de prueba de concepto, donde se desea evaluar la posibilidad de utilizar dispositivos comerciales para desarrollar nuevas aplicaciones. El primer aprendizaje importantes de este caso ha sido la importancia de caracterizar adecuadamente la instrumentación antes de utilizarla. En un trabajo un reciente se encontraron diferencias en la desviación respecto a un vibrómetro patrón de hasta el 20% para determinados dispositivos. Además, la cantidad de capas software que incluyen algunas de estas plataformas, cuyo objetivo es facilitar el desarrollo de aplicaciones, en ocasiones se vuelven en contra y dificultan entender exactamente qué tareas realiza el dispositivo en cada momento. Así en algunos relojes inteligentes se han obtenido errores de medida anormalmente elevados debidos a cómo gestiona el sistema operativo los procesos de adquisición del acelerómetro, y no debido a la precisión del mismo.

En este ejemplo, se han combinado tanto técnicas tradicionales como de aprendizaje máquina y profundo, y todas han puesto de relevancia la importancia que tiene el coste de generación de los datos, que en esta aplicación implica trabajar con colectivos vulnerables. En ese sentido, iniciativas como la política de ciencia abierta promovida por la Comisión Europea y los repositorios para el trabajo colaborativo deben jugar un papel vital para minimizar la carga sobre los pacientes. Sin embargo, para que los datos que se comparten sean aún más útiles es imprescindible estandarizar las metodologías y poner en marcha mecanismos que faciliten su completa descripción.

6. REFERENCIAS

1. Alonso Fernández, J. *Discriminación del estado de la carretera mediante procesado acústico en vehículo. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM).* <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.33529>. . 2014.

2. *On-board wet road surface identification using tyre/road noise and Support Vector Machines.* al, Alonso J. et. s.l. : Applied Acoustics, (2014), Vols. 76, pp. 407 - 415. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.09.011.
3. Alonso, J. et al. *Sistema embarcado en vehículos y método para la detección del estado del asfalto.* P201231042 España, 02 25, 2013.
4. *Towards sustainability assessment of machining processes.* H.A. Hegab, B. Darras, H.A. Kishawy. 2018, Journal of Cleaner Production, Vol. 170, pp. 694-703.
5. Sio Sever, A. *Supervisión de las condiciones de mecanizado en operaciones de fresado periférico mediante el análisis de señales de ruido aéreo.* Madrid : Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2022.
6. *Non-Invasive Estimation of Machining Parameters during End-Milling Operations Based on Acoustic Emission.* Sio-Sever, et al. 2020, Sensors, pp. 20, 5326.
7. *Improved Estimation of End-Milling Parameters from Acoustic Emission Signals Using a Microphone Array Assisted by AI Modelling.* al, Sio-Sever et. s.l. : Sensors , 2022, Vols. 22(10), 3807; <https://doi.org/10.3390/s22103807> .
8. *Accuracy of a new online method for measuring machining parameters in milling.* Leal-Muñoz et al. 2018, Measurement, pp. 128, 170–179.
9. Sigcha Guachamin, L. *Detección automática de síntomas motores asociados a la enfermedad de Parkinson mediante relojes y teléfonos móviles inteligentes aplicando técnicas de inteligencia artificial.* . s.l. : Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 2021. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.68904> .
10. al, Sigcha L. et. *Occupational risk prevention through smartwatches: Precision and uncertainty effects of the built-in accelerometer.* s.l. : Sensors, 18 (11), art. no. 3805, 2018. DOI: 10.3390/s18113805.
11. *Improvement of Performance in Freezing of Gait detection in Parkinson's Disease using Transformer networks and a single waist-worn triaxial accelerometer.* al, Sigcha L. et. s.l. : Engineering Applications of Artificial Intelligence, 116, art. no. 105482, 2022. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105482.
12. *Automatic resting tremor assessment in parkinson's disease using smartwatches and multitask convolutional neural networks.* al, Sigcha L. et. s.l. : Sensors, 21 (1), art. no. 291, pp. 1 - 29, 2021. DOI: 10.3390/s21010291.
13. *Deep learning approaches for detecting freezing of gait in parkinson's disease patients through on-body acceleration sensors.* al, Sigcha L. et. s.l. : Sensors, 20 (7), art. no. 1895, 2020. DOI: 10.3390/s20071895.
14. *Automatic Identification of Hand-Held Vibrating Tools Through Commercial Smartwatches and Machine Learning.* al, Sigcha L. et. s.l. : Studies in Systems, Decision and Control, 277, pp. 481 - 489, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-41486-3_52.
15. *Bradykinesia Detection in Parkinson's Disease Using Smartwatches' Inertial Sensors and Deep Learning Methods.* al, Sigcha et. s.l. : Electronics, 11 (23), art. no. 3879, 2022. DOI: 10.3390/electronics11233879.



ACÚSTICA Y NEUROCIENCIA. APLICACIONES EN EL CAMPO DE LAS ENFERMEDADES NEURODEGENERATIVAS.

David González¹, Pablo García², Juan Manuel López³, Ignacio Pavón¹, César Asensio³, Guillermo de Arcas Castro^{1*}

¹Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

² Centro de Tecnología Biomédica. Grupo de Tecnologías para Ciencias de la Salud. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

³ Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETSI Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

En los últimos años términos como neurociencia o neurotecnología han tomado una gran relevancia en el ámbito de la investigación impulsados por grandes iniciativas internacionales como Ebrains en la UE o The Brain Initiative en EEUU. Según apunta la propia definición de la RAE la neurociencia es un campo transversal y como tal incluye también una importante actividad relacionada con la acústica, que va desde cuestiones más tradicionales como el estudio del sistema auditivo y la psicoacústica, hasta el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar el diagnóstico y tratamiento de diferentes patologías de tipo neurológico. Con este último objetivo se creó el Laboratorio de Neuroacústica, un programa de investigación conjunta en el que colaboran investigadores de diferentes instituciones agrupados en dos grandes áreas de estudio: estimulación acústica y monitorización de síntomas motores mediante dispositivos vestibles. En este trabajo se presentarán los resultados obtenidos en ambas líneas, así como los principales retos y oportunidades identificados.

ABSTRACT

Research in neuroscience and neurotechnology has greatly increased in recent years driven by large international initiatives such as Ebrains in the EU or The Brain Initiative in the US. Neuroscience is a transversal field and as such also includes relevant contributions from acoustics, which ranges from more traditional issues such as the study of the auditory system and psychoacoustics, to the development of new technologies for improve the diagnosis and treatment of

different neurological pathologies. With this last objective, the Laboratory of Neuroacoustics was created as a joint research program in which researchers from different institutions collaborate in two large areas of study: acoustic stimulation and monitoring of motor symptoms using pervasive technologies. In this work, the results obtained in both lines will be presented, as well as the main challenges and opportunities identified.

Palabras Clave— Neurociencia, estimulación acústica, monitorización, dispositivos vestibles, Parkinson.

1. INTRODUCCIÓN

En una sociedad cada vez más longeva, y con una pirámide poblacional invertida, el tratamiento y gestión clínica de las enfermedades neurodegenerativas constituye uno de nuestros grandes retos como sociedad. La Organización Mundial de la Salud ha reconocido estas enfermedades como “un problema de salud mundial que debe ser abordado sin demora por motivos humanitarios, sociales y económicos” (1). Este es el caso de la Enfermedad de Parkinson (EP), donde el número de afectados aumentó un 250% entre 1990 y 2015, y que afecta a casi 24 millones de personas en el mundo. Actualmente en España se diagnostica un nuevo caso de EP cada 45’ aproximadamente, y un 15% es en menores de 45 años.

La EP es una enfermedad neurodegenerativa progresiva caracterizada por la degeneración selectiva de neuronas dopaminérgicas de la sustancia nigra pars compacta (SNpc), que forma parte de los ganglios basales que soportan la red cortico-subcortical que permite el desarrollo de funciones límbicas, asociativas, cognitivas y motoras. Se

* **Autor de contacto:** g.dearcas@upmes

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

caracteriza por la aparición en diferente grado de acinesias, bradicinesias, discinesias, rigidez muscular, temblor, caminar vacilante, postura arqueada, rigidez facial, parpadeo escaso y escritura irregular y de reducido tamaño. Otros síntomas comunes son depresión, sueño, cambios en el estado de humor (apatía), problemas cognitivos, dolor inexplicable, pérdida de autonomía, disfunciones urinarias, fatiga y el goteo de saliva entre otros.

La principal herramienta clínica para monitorizar su progresión es la escala de calificación funcional H&Y y UPDRS, y el tratamiento es de carácter paliativo, con evaluaciones clínicas en intervalos de 3 a 12 meses en España, dependiendo del grado de avance de la enfermedad. La necesidad de disponer de mecanismos para la evaluación objetiva ha propiciado el uso de herramientas tecnológicas para facilitar la gestión y optimizar el seguimiento a largo plazo en la EP (2), lo que, en un futuro, con la madurez de las soluciones tecnológicas, se traducirá en una mejor accesibilidad a la atención médica al reducir los costes, tiempos dedicados al diagnóstico y minimizará las barreras físicas entre los pacientes y los centros médicos (3) (4).

También resulta imprescindible avanzar del lado de los tratamientos. La farmacoterapia y la cirugía son las terapias más comunes en combinación con tratamientos no farmacológicos. La farmacoterapia tiene como objetivo restablecer los niveles de dopamina para mantener la funcionalidad motora el mayor tiempo posible. Resulta efectiva para mejorar la hipocinesia y el temblor, pero sólo durante una ventana terapéutica de 5 a 10 años después de los cuales del 50% al 80% de los pacientes desarrollan discinesias (movimientos musculares involuntarios). Además, algunos pacientes no responden a este tratamiento. En ese contexto los tratamientos no farmacológicos juegan un papel crítico para mejorar la calidad de vida del paciente. Además de las terapias convencionales (ejercicio activo, fisioterapia, terapia ocupacional, logopedia, entrenamiento cognitivo o musicoterapia), la investigación en técnicas experimentales de neuroestimulación no invasivas, como la estimulación transcraneal y la estimulación acústica, está atrayendo gran interés, habiéndose publicado más de 50 ensayos clínicos entre 2013 y 2015 (5).

En este contexto el Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada y el Centro de Tecnología Biomédica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) promovieron la creación del Laboratorio de Neuroacústica en el año 2016, como un programa de investigación conjunto en el que investigadores de diferentes instituciones colaboran en el desarrollo y aplicación de tecnologías acústicas para contribuir a mejorar la calidad de vida de los afectados por este tipo de patologías. Los dos principales ejes en los que se ha venido trabajando hasta el momento son: el estudio de las técnicas de estimulación acústica y la monitorización de síntomas motores con tecnologías ubícuas. A continuación, se resume la actividad

desarrollada en cada una de estas líneas, así como los principales resultados obtenidos.

2. ESTIMULACIÓN ACÚSTICA

El término estimulación acústica pretende englobar todas aquellas técnicas de estimulación basadas en fenómenos vibro-acústicos, por lo que incluirá desde la estimulación auditiva mediante estímulos sonoros, al empleo de los ultrasonidos o la estimulación mediante vibraciones. En concreto, la mayor parte de los trabajos realizados hasta el momento en el LNA se han centrado en el estudio de la estimulación auditiva utilizando ritmos binaurales.

Los ritmos binaurales o binaural beats (BB) son modulaciones lentas que se perciben cuando se presentan por separado en cada oído tonos puros de diferentes frecuencias, lo que da lugar a la percepción de un tercer tono de frecuencia igual a la diferencia de frecuencia de los dos tonos puros presentados en cada oído (es decir, frecuencia portadora). Por ejemplo, si un tono puro de 400 Hz es presentado en el oído izquierdo y otro de 410 Hz es presentado en el derecho, esto produce una frecuencia percibida de 405 Hz que se modula en amplitud a una frecuencia de 10 Hz. Esta señal modulada es a veces conocida como un pulso y puede ser producida cuando la diferencia de frecuencia entre dos tonos portadores oscila entre 2 y 30 Hz (37), aunque estudios recientes han discutido y demostrado que también pueden percibirse ritmos con frecuencias de 40 Hz (38, 39). Los BB requieren la acción combinada de mecanismos perceptivos asociados a los estímulos provenientes de los dos oídos y, por lo tanto, tienen un gran potencial para investigar los procesos cerebrales.

Se han realizado multitud de estudios que apuntan que la escucha de pulsos binaurales puede influir en el comportamiento y en la cognición de múltiples formas. Gran parte de estos estudios han investigado los efectos de los BB en la actividad cerebral mediante el análisis de la potencia de las bandas de frecuencia tradicionales delta (2 - 4 Hz), theta (4 - 8 Hz), alfa (8 - 12 Hz), beta (12 - 30 Hz) y gamma (30 - 40 Hz), a través de registros electroencefalográficos (EEG)..

Parece surgir cierto consenso en que la exposición a los BB puede provocar cambios en la actividad neuronal en el córtex, generando un efecto de arrastre (entrainment) a través de las oscilaciones neuronales en la frecuencia del ritmo binaural. Por ejemplo, se ha sugerido que la actividad en el córtex auditivo puede sincronizarse con BB lentos y tienen la capacidad de preservar la información de la diferencia de fase interaural (Karino et al. 2004). En un estudio posterior (Kasprzak y Karino 2011) se probó que la exposición a ritmos binaurales de 10 Hz conllevaban un efecto de seguimiento, observándose una componente de frecuencia en la morfología de la señal del EEG que se corresponde con la frecuencia de los BB expuestos.

Otras investigaciones han estudiado, mediante electroencefalografía (EEG), la generación de una Respuesta de Seguimiento de la Frecuencia o Frequency Following

Response (FFR), que consiste en un tipo de respuesta cerebral que refleja el arrastre, asociada a la exposición a este tipo de estímulos, observando, por ejemplo, que la aplicación de BB a 6 Hz durante 10 minutos indujo la actividad theta globalmente, en todo el córtex (Jirakittayakorn y Wongsawat 2017b). En un estudio más reciente (da Silva Junior et al. 2019) también se produjo una inducción de la actividad theta con la presentación de BB a 5 Hz durante 20 minutos. Sin embargo, otros estudios sugieren un efecto menos claro sobre la inducción o la FFR relacionada con la presentación de los BB. Por ejemplo, en una investigación (Vernon et al. 2014) con dos grupos que escucharon BB en la banda alpha (10 Hz) y en la banda beta (20 Hz) no se mostró ningún efecto de los BB que provocara un efecto de seguimiento de la frecuencia en el electroencefalograma, aunque una de las limitaciones más importantes de este estudio era que solo se grabaron dos canales de EEG (correspondientes a las posiciones T3 y T4), apuntando los autores que futuros estudios deberían registrar la actividad en todo el cuero cabelludo para poder obtener mejores conclusiones.

2.1. Estudios clínicos

La investigación en este campo comenzó con el desarrollo de una metodología que permitiera realizar estudios sobre el empleo de la estimulación binaural (6). Tras realizar unos primeros estudios con personas sanas para demostrar su inocuidad y depurar la metodología se realizó un estudio transversal con pacientes de Parkinson (7) en colaboración con el doctor Martínez Castrillo, Jefe de Unidad de Enfermedades Neurodegenerativas del Hospital Ramón y Cajal. Se contó con una muestra inicial de 45 pacientes reclutados a través del hospital y la Asociación de Parkinson Madrid. De ellos se seleccionaron 14 pacientes que presentaban una audición normal, una puntuación mayor de 24 en el test MMSE y una puntuación inferior a 4 en la escala Hoehn y Yahr. Además, a todos los pacientes se les realizó una evaluación cognitiva específica para la EP mediante el test PD-CRS.

Estos 14 pacientes participaron en dos sesiones de estimulación sonora de 10 minutos (una control/placebo y otra experimental) separadas por un mínimo de 7 días. La estimulación control/placebo consistió en un ruido rosa, mientras que la experimental fue ese mismo ruido rosa al que se añadió una combinación de sonido rítmico-binaural. Para evaluar la influencia del sonido a corto plazo en los pacientes, se recogieron los siguientes datos justo antes y después de ambas estimulaciones: registros de EEG en estado de reposo, grabación en vídeo del caminar, registro con acelerómetros del temblor postural en manos, grabación de voz (lectura de un texto y emisión de las vocales), el test cognitivo PD-CRS y otro test de ansiedad (STAI-estado7).

Para la estimulación experimental se observó: un descenso en la actividad theta según se muestra en la figura 1, un descenso generalizado de la conectividad funcional, un

descenso del ritmo cardiaco, mejora de la memoria de trabajo y mejoras en las medidas de la voz jitter y shimmer (8) (9). Sin embargo, no se encontraron cambios significativos en: la frecuencia mediana de la potencia electroencefalográfica, el rendimiento motor, en el nivel de ansiedad de los pacientes, ni en las medidas de la voz jitter y frecuencia fundamental. En la estimulación control/placebo no se observaron apenas cambios significativos en las variables analizadas.

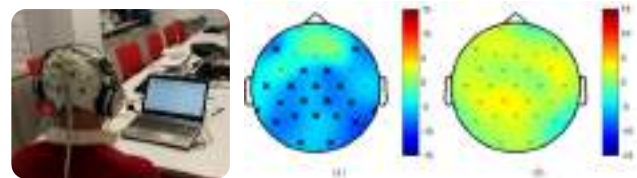


Figura 1. Diferencia relativa de la potencia en theta antes y después de escuchar: la estimulación activa (A) y la control (B)

A la vista de los resultados obtenidos en una única sesión se realizó un estudio longitudinal con una duración de seis meses (10). En este caso participaron 12 pacientes (edad 58.75 ± 10.71 , estadío H&Y 2.17 ± 0.75) y no hubo grupo control, ya que el objetivo era ver cómo evoluciona la respuesta ante el estímulo binaural a largo plazo. Los participantes escucharon la estimulación 10 minutos al día, 3 días por semana, durante 6 meses. La respuesta a la estimulación se evaluó al inicio del estudio (situación basal), y a la mitad y al final del mismo, mediante el registro del electroencefalograma y la realización de cuestionarios de calidad de vida (PDQ-39) y Wearing-off (WOQ-19).

Se analizó la potencia relativa de la banda theta antes, durante y después de la estimulación en las tres sesiones (S1-S3), centrando el análisis en la corteza motora. Según se muestra en la figura 2 los resultados obtenidos han confirmado la hipótesis inicial para la primera sesión, pero han mostrado un efecto de habituación que disminuye su eficiencia con el tiempo. Asimismo, se han detectado diferentes reacciones entre los individuos, algunos reaccionando como se esperaba desde el principio, mientras que otros reaccionarían de forma opuesta al principio, pero han mostrado después una tendencia hacia el resultado esperado. No obstante, la potencia en theta se redujo entre la primera y la última sesión para más de la mitad de los participantes, aunque con valores muy diferentes. También se observaron cambios sutiles en algunos ítems de las pruebas PD-CRS, PDQ-39 y WOQ-19.

A continuación se lanzó otro estudio longitudinal utilizando la misma estimulación pero centrado en evaluar los síntomas motores mediante relojes inteligentes y una aplicación móvil desarrollada específicamente dentro del proyecto TECA-PARK (11). Todos los participantes habían sido diagnosticados previamente con valores similares (2-3) en la escala de Hoehn y Yahr. Los pacientes de EP escucharon dos veces al día durante los tres meses una

estimulación acústica que podía ser experimental o control, asignándose esta estimulación de forma aleatoria. De esta forma, los participantes se dividieron en tres grupos: 6 escucharon la estimulación experimental (PD A), 8 escucharon la estimulación control (PD B) y 7 formaron un de control de sujetos sanos (HC) que no escuchó ninguna estimulación. La evaluación de síntomas consistía en que los participantes realizaran una serie de ocho ejercicios extraídos de las escalas de valoración clínica una vez la semana de forma supervisada mientras llevaban un reloj inteligente. A partir de las señales registradas mediante los sensores del reloj se desarrollaron tres indicadores para el seguimiento de síntomas motores (temblor en reposo, constancia de temblor, y bradiquinesia) mediante técnicas de inteligencia artificial, según se describirá en la sección 3.

Los resultados preliminares (12) de este estudio sobre un individuo de cada grupo experimental muestran la capacidad de los indicadores desarrollados para distinguir entre enfermos de Parkinson y sujetos de control, así como para realizar un seguimiento de la evolución de dichos síntomas. Sin embargo, la variabilidad de los indicadores a lo largo del tiempo no ha permitido analizar el posible efecto del tipo de estimulación. No obstante, en la actualidad se están analizando los datos del grupo completo y todo parece apuntar a un ligero efecto normalizador en el grupo experimental.

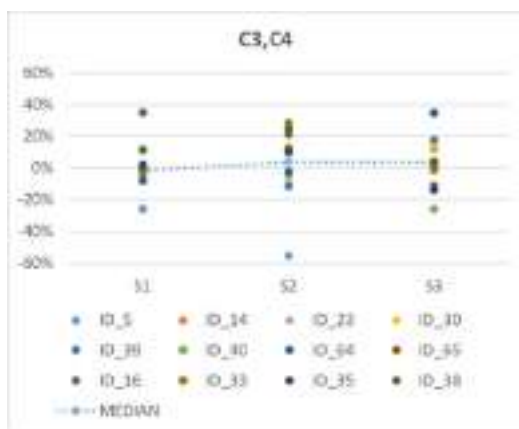


Figura 2. Relación post-estimulación versus pre-estimulación en cada sesión (S1, S2, S3) para cada participante (IDx) para los electrodos C3, C4.

2.3. Estudios preclínicos

Los resultados obtenidos en estos primeros estudios han puesto de manifiesto la necesidad de realizar estudios en modelos animales para poder optimizar los protocolos de estimulación y profundizar en los mecanismos que sustentan los cambios detectados. Este trabajo se está realizando en colaboración con el profesor Daniel González, director del Grupo de Tecnologías para Ciencias de la Salud del Centro

de Tecnología Biomédica de la UPM. Actualmente se está terminando de caracterizar un modelo de Parkinson basado en 6-hidroxidopamina (6-OHDA) a través de test funcionales, EEG y potenciales evocados auditivos, y en paralelo se han realizado los primeros estudios de estimulación con ratones sanos de la misma cepa para adaptar la metodología de los estudios, que lógicamente requieren algunos cambios tanto en la estimulación como en los métodos de evaluación.

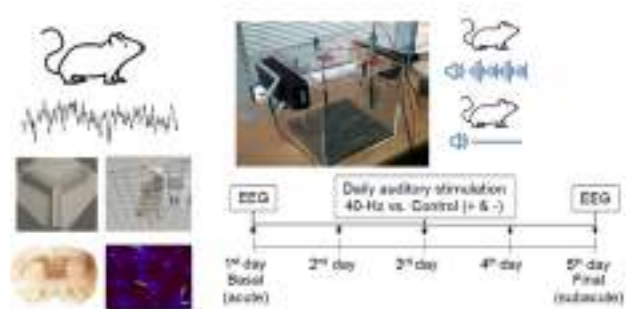


Figura 3. Esquema de trabajo en la línea preclínica sobre estimulación acústica.

3. MONITORIZACIÓN DE SÍNTOMAS MOTORES

La necesidad de disponer de métodos objetivos de evaluación en el ámbito de la Enfermedad de Parkinson ha propiciado la utilización de herramientas tecnológicas para simplificar la gestión de la enfermedad y para mejorar su seguimiento a largo plazo (13-16). Este tipo de herramientas tiene el potencial de mejorar la accesibilidad a la atención médica, al mismo tiempo que reducen los costes asociados a la atención médica y sirven para mejorar la accesibilidad de los pacientes a los centros médicos (17,18). Las tecnologías de salud móvil (m-health), como puede ser el caso de aplicaciones basadas en dispositivos vestibles y dispositivos inteligentes, representan una oportunidad para el desarrollo de herramientas clínicas que sirvan para la detección temprana, la monitorización remota y la medición objetiva de los síntomas a lo largo del tiempo (18-21).

Estas tecnologías disminuyen la carga para el paciente y suministrar información organizada sobre la evolución de los síntomas (22). Además, los datos recolectados mediante las tecnologías de salud móvil pueden facilitar la obtención de biomarcadores digitales para cuantificar de manera objetiva la progresión de los síntomas y evaluar los efectos del tratamiento o las intervenciones terapéuticas (23, 24).

En la línea de investigación de monitorización de síntomas motores, el Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada ha trabajado en el desarrollo de tecnologías para reconocimiento de la actividad humana a través de diferentes proyectos [25, 26], cuyos

resultados [27-30] permitieron definir una metodología de monitorización de la actividad motora basada en la utilización de dispositivos wearables y técnicas de inteligencia artificial.

En el año 2018 se aplicaron estas tecnologías en la monitorización de síntomas motores de la enfermedad de Parkinson en los proyectos TECA-PARK (2018-2020; CENIE, programa Interreg V-A España-Portugal POCTEP,) y Translating neuro-acoustic technologies into solutions for older people (2019-2020; Massachusetts Institute of Technology Global Seed Funds). En estos proyectos se desarrolló un sistema para la monitorización de la función motora en enfermos de Parkinson (MoniPar) basado en tecnología wearable con la participación de investigadores del AgeLab-MIT, Universidad de Minho y tres hospitales de España y Portugal. Dicho sistema se validó en un estudio clínico realizado con un grupo de 30 pacientes durante 6 meses con la colaboración de 5 asociaciones de Parkinson según se muestra en la siguiente figura.

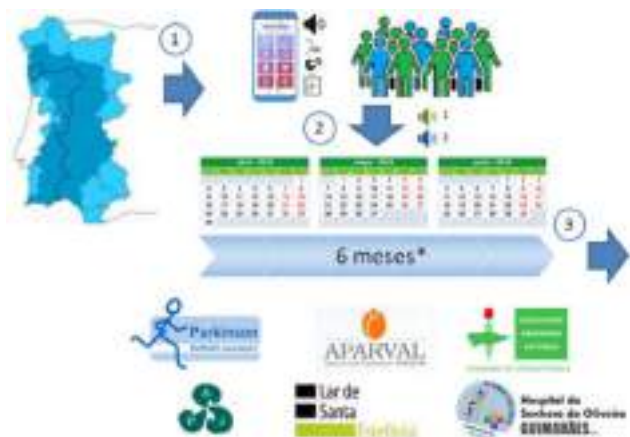


Figura 4. Esquema del estudio realizado en el proyecto Teca-Park.

El sistema actual consta de una App que guía al paciente en la realización de 8 ejercicios extraídos de la escala UPDRS (Unified Parkinson's Disease Rating Scale), y un módulo software desarrollado para un reloj inteligente que permite extraer señales de acelerometría durante cada ejercicio para monitorizar la actividad motora. A partir de estas señales se han desarrollado varios marcadores digitales (temblor y bradicinesia) mediante técnicas de inteligencia artificial que han sido validados por los neurólogos, así como un detector de congelación de la marcha que mejoran los resultados alcanzados hasta el momento en el estado del arte [31-34]. En este contexto se ha desarrollado una tesis doctoral [35] y se han generado varios registros de software [36].

4. CONCLUSIONES

La actividad desarrollada hasta el momento y los resultados alcanzados confirman la oportunidad e interés de este tipo de

investigaciones y el elevado potencial de la ingeniería acústica para realizar aportaciones relevantes en relación con este tipo de patologías. Pero también han demostrado la necesidad de agrupar equipos multidisciplinares de suficiente masa crítica para poder abordar problemas complejos. En algunos casos, como los estudios de estimulación acústica, se hace necesaria una investigación básica que nos ayude a entender los mecanismos subyacentes que pueden estar interviniendo en los cambios observados y por tanto habrá que recorrer un camino más largo para poder traducir este conocimiento en potenciales herramientas clínicas. Sin embargo, en otros casos como la monitorización de síntomas motores, es posible realizar una investigación más aplicada que pueda contribuir a mejorar la gestión clínica de estas patologías a corto-medio plazo y por tanto contribuya en la calidad de vida de los afectados.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los voluntarios que participan en estos estudios y sus familiares, así como a las asociaciones de pacientes y a los investigadores que colaboran en este programa, especialmente del Grupo de Tecnologías para Ciencias de la Salud de la UPM, del Centro de Neurociencia Cognitiva y Computacional de la Universidad Complutense de Madrid y de la Unidad de Enfermedades Neurodegenerativas del Hospital Ramón y Cajal.

6. REFERENCIAS

1. OMS, Organización Mundial de la Salud. Plan de acción sobre salud mental 2013-2020. s.l. : Ediciones de la OMS. ISBN 978 92 4 350602 9, 2013.
2. Technology-Enabled Care: Integrating Multidisciplinary Care in Parkinson's Disease Through Digital Technology. Luis-Martínez et al. 2020, *Frontiers in neurology*, págs. 11, 575975.
3. Home monitoring of motor fluctuations in Parkinson's disease patients. Borzi et al. 2019, *Journal of Reliable Intelligent Environments*, págs. 5, 145-162.
4. Cabestany et al. A. Parkinson's Disease Management Through ICT: The REMPARK Approach. Aalborg : Aalborg: River Publishers, 2017.
5. Nonpharmacological tratamientos para pacientes with Parkinson's disease. al, Bloem B. R. et. s.l. : *Mov. Disord.*, vol. 30, no. 11, pp. 1504-1520, Sep. ., 2015.
6. Crespo, A. Bases para un diseño metodológico de estimulación binaural como terapia acústica en neurología. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.35019>. 2015.
7. Gálvez, G. et al. Short-Term Efectos de Binaural Beats on EEG Power, Functional Connectivity, Cognition, Gait y Anxiety en Parkinson's Disease. : *Int. J. Neural Syst.*, vol. 28, no. 05, p. 1750055, 2018.
8. Temporal reversion of phonation instability in Parkinson's disease by neuroacoustical stimulation. . al, Gálvez-García G et. 11th International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications : s.n., 2019.

9. Neuroacoustical Stimulation of Parkinson's Disease Patients: A Case Study. al, Gálvez-García G et. s.l. : IWINAC 2019. Lecture Notes in Computer Science., 2019.
10. First Longitudinal Study Using Binaural Beats on Parkinson Disease. al, González D et. 06, s.l. : International Journal of Neural Systems, 2023, Vol. 33. 2350027.
11. Tecnologías Capacitadoras para la Asistencia, Seguimiento y Rehabilitación de Pacientes con Enfermedad de Parkinson. <http://www.i2a2.upm.es/tecapark/>. [En línea]
12. Monitoring Motor Symptoms in Parkinson's Disease Under Long Term Acoustic Stimulation. Sigcha et al. s.l. : Springer, 2022. Artificial Intelligence in Neuroscience: Affective Analysis and Health Applications. IWINAC 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13258.
13. Godinho C, Domingos J, Cunha G, et al. A systematic review of the characteristics and validity of monitoring technologies to assess Parkinson's disease. *J Neuroeng Rehabil* 2016. DOI: 10.1186/s12984-016-0136-7.
14. Prasad R, Babu S, Siddaiah N, et al. A review on techniques for diagnosing and monitoring patients with parkinson's disease. *J Biosens Bioelectron* 2016.
15. Sánchez-Ferro Á, Elshehabi M, Godinho C, et al. New methods for the assessment of Parkinson's disease (2005 to 2015): A systematic review. *Mov Disord* 2016. DOI: 10.1002/mds.26723.
16. Luis-Martínez R, Monje MHG, Antonini A, et al. Technology-Enabled Care: Integrating Multidisciplinary Care in Parkinson's Disease Through Digital Technology. *Front Neurol* 2020. DOI: 10.3389/fneur.2020.575975.
17. Borzì L, Varrecchia M, Olmo G, et al. Home monitoring of motor fluctuations in Parkinson's disease patients. *J Reliable Intell Environ* 2019. DOI: 10.1007/s40860-019-00086-x.
18. Del Din S, Kirk C, Yarnall AJ, et al. Body-Worn Sensors for Remote Monitoring of Parkinson's Disease Motor Symptoms: Vision, State of the Art, and Challenges Ahead. *J Parkinsons Dis* 2021. DOI: 10.3233/JPD-202471 [doi].
19. Linares-Del Rey M, Vela-Desojo L and Cano-de LC. Aplicaciones móviles en la enfermedad de Parkinson: una revisión sistemática. *Neurología* 2019. DOI: 10.1016/j.nrl.2017.03.006.
20. Rovini E, Maremmani C and Cavallo F. How Wearable Sensors Can Support Parkinson's Disease Diagnosis and Treatment: A Systematic Review. *Front Neurosci* 2017. DOI: 10.3389/fnins.2017.00555.
21. Sigcha L, Borzì L, Amato F, et al. Deep learning and wearable sensors for the diagnosis and monitoring of Parkinson's disease: A systematic review. *Expert Syst Appl* 2023.
22. Pahwa R, Bergquist F, Horne M, et al. Objective measurement in Parkinson's disease: a descriptive analysis of Parkinson's symptom scores from a large population of patients across the world using the Personal KinetiGraph. *J Clin Mov Disord* 2020. DOI: 10.1186/s40734-020-00087-6.
23. Bent B, Wang K, Grzesiak E, et al. The digital biomarker discovery pipeline: An open-source software platform for the development of digital biomarkers using mHealth and wearables data. *J Clin Transl Sci* 2020. DOI: 10.1017/cts.2020.511 [doi].
24. Mahadevan N, Demanuele C, Zhang H, et al. Development of digital biomarkers for resting tremor and bradykinesia using a wrist-worn wearable device. *NPJ Digit Med* 2020. DOI: 10.1038/s41746-019-0217-7.
25. Desarrollo de soluciones basadas en el uso de tecnología wearable para la detección y prevención de los riesgos de la exposición a vibraciones mecánicas y caídas. *Fundación Prevent* 2017.
26. Monitoreado en tiempo real de actividades humanas para la gestión de riesgos laborales mediante el uso de tecnología wearable e inteligencia artificial, un estudio piloto en entornos industriales. *Fundación Prevent* 2020.
27. Sigcha, L., et. al. Occupational Risk Prevention through Smartwatches: Precision and Uncertainty Effects of the Built-In Accelerometer. *Sensors* 2018, 18, 3805.
28. I. Pavón, et. al. Wearable technology usefulness for occupational risk prevention: smartwatches for hand - arm vibration exposure assessment. *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene SHO-17. Guimarães (Portugal)*. Abril 2017.
29. I. Pavón, et. al. Wearable technology for occupational risk assessment: potential avenues for applications. *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene. SHO-17. SHO-17. Guimarães (Portugal)*. Marzo 2018.
30. I. Pavón, et. al. Identificación automática del uso de herramientas vibratorias manuales mediante smartwatches comerciales y técnicas de machine learning. *ORP Conference*. Madrid. Junio, 2019.
31. Sigcha, L.; Pavón, I.; Costa, N.; Costa, S.; Gago, M.; Arezes, P.; López, J.M.; De Arcas, G. Automatic Resting Tremor Assessment in Parkinson's Disease Using Smartwatches and Multitask Convolutional Neural Networks. *Sensors* 2021, 21, 291.
32. Sigcha, L.; Costa, N.; Pavón, I.; Costa, S.; Arezes, P.; López, J.M.; De Arcas, G. Deep Learning Approaches for Detecting Freezing of Gait in Parkinson's Disease Patients through On-Body Acceleration Sensors. *Sensors* 2020, 20, 1895.
33. Sigcha, L.; Domínguez, B.; Borzì, L.; Costa, N.; Costa, S.; Arezes, P.; López, J.M.; De Arcas, G.; Pavón, I. Bradykinesia Detection in Parkinson's Disease Using Smartwatches' Inertial Sensors and Deep Learning Methods. *Electronics* 2022, 11, 3879. <https://doi.org/10.3390/electronics11233879>
34. Luis Sigcha, Luigi Borzì, Ignacio Pavón, Nelson Costa, Susana Costa, Pedro Arezes, Juan Manuel López, Guillermo De Arcas, Improvement of Performance in Freezing of Gait detection in Parkinson's Disease using Transformer networks and a single waist-worn triaxial accelerometer, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 116, 2022.
35. Sigcha Guachamin, Luis Francisco (2021). Detección automática de síntomas motores asociados a la enfermedad de Parkinson mediante relojes y teléfonos móviles inteligentes aplicando técnicas de inteligencia artificial. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.68904>
36. FallDTR. Núm. solicitud: M-003717-21. Número de asiento registral: 16 / 2021 / 7725. Universidad Politécnica de Madrid. 27/05/2021.
37. PERROTT, D.R. y NELSON, M.A., 1969. Limits for the detection of binaural beats. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 46, no. 6B, pp. 1477-1481. ISSN 00014966. DOI 10.1121/1.1911890
38. GROSE, J.H., BUSS, E. y HALL, J.W., 2012. Binaural beat salience. *Hearing Research*, vol. 285, no. 1-2, pp. 40-45. ISSN 03785955. DOI 10.1016/j.heares.2012.01.012.
39. ROSS, B., MIYAZAKI, T., THOMPSON, J., JAMALI, S. y FUJIOKA, T., 2014. Human cortical responses to slow and fast binaural beats reveal multiple mechanisms of binaural hearing. *Journal of Neurophysiology*, vol. 112, no. 8, pp. 1871-1884. ISSN 15221598. DOI 10.1152/jn.00224.2014.

DEL VISUAL AL AUDITIVO: SONORIZACIÓN DE ESCENAS GUIADA POR IMAGEN

M. Sánchez-Ruiz^{1*}, L. Fernández-Galindo¹, J.D. Arias-Londoño¹, M. Cámara-Largo^{1,2}, G. Comini³,
A. Gabrys³, J.L. Blanco-Murillo^{1,2}, J.I. Godino-Llorente¹, L.A. Hernández-Gómez^{1,2}

¹ ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense 30, 28040 Madrid

² Information Processing and Telecommunication Center, UPM. Avda. Complutense 30, 28040 Madrid

³ Amazon.com

RESUMEN

Los recientes avances en las técnicas generativas de imagen, vídeo, texto y audio, y su uso por el gran público, están propiciando nuevas formas de generación de contenidos. Habitualmente, se abordaba cada modalidad por separado, lo que plantea limitaciones. La sonorización automática de secuencias visuales es uno de los mayores desafíos de cara a la generación automática de contenidos multimodales.

Presentamos un flujo de procesamiento que, a partir de imágenes extraídas de vídeos, es capaz de sonorizarlas. Trabajamos con modelos pre-entrenados que emplean complejos codificadores, aprendizaje contrastivo, y múltiples modalidades, permitiendo representaciones complejas de las secuencias para su sonorización.

El esquema propuesto plantea distintas posibilidades para la asignación de los audios y el guiado por texto. Evaluamos el esquema sobre un *dataset* de marcos extraídos de un videojuego comercial y sonidos extraídos de la plataforma Freesound. Las pruebas subjetivas han evidenciado que el esquema propuesto es capaz de generar y asignar audios automática y convenientemente a las imágenes. Además, se adapta bien a las preferencias de los usuarios, y las métricas objetivas propuestas presentan una correlación elevada con las valoraciones subjetivas.

ABSTRACT

Recent advancements in generative techniques for images, videos, text, and audio have been widely embraced by the public, leading to innovative content-generation methods. Typically, these methods address each type of content separately, which has limitations for automatization. One of the game-changing challenges is to automatically add sound to video and image sequences.

We present a processing pipeline that can automatically sonorize video sequences using multimodal representations. We utilize pre-trained models with complex encoders and contrastive learning during training. These models combine various modalities, allowing for sophisticated representations of image sequences and sound.

Our framework offers multiple options for audio allocation and text-guided sonorization. We evaluate the framework using a dataset of frames from a commercial video game and sounds from the Freesound platform. Initial subjective tests demonstrate that the framework can effectively generate and assign audio to images, matching user preferences. The proposed objective metrics based on the multimodal representations show a strong correlation with user ratings and are entirely based on embedding metrics.

Palabras Clave— Inteligencia artificial, sonorización automática de escenas, representación multimodal, aprendizaje contrastivo, aprendizaje máquina.

1. INTRODUCCIÓN

Las últimas décadas han presenciado un avance sin igual en el desarrollo de la inteligencia artificial (IA). Recientemente una serie de hitos han alterado el desarrollo de estas tecnologías, así como su acceso para el gran público y el empleo que hacen de ellas. Frente a los reconocidos avances en imagen y texto, la generación realista de audio y vídeo todavía plantea importantes retos. Esto se debe a la complejidad de generar audio de alta calidad, que resulte natural al oído humano, mucho más sensible que el ojo. Además, los audios deben guardar relación con las imágenes [1], evocando o ajustándose a las imágenes según el caso, o complementando su contenido con información adicional, del contexto o del ambiente, por ejemplo.

* **Autor de contacto:** maria.sanruiz@alumnos.upm.es

Copyright: ©2023 M. Sánchez-Ruiz et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Mientras que existen multitud de plataformas capaces de generar imágenes a partir de descripciones, tales como DALL-E de OpenAI [2], hay muchas menos capaces de generar audio de calidad a partir de imágenes o descripciones [3, 4]. Los motivos detrás de esta situación podrían estar relacionados con la falta de grandes conjuntos de datos que incluyan pares de texto y audio de alta calidad [5], la falta de métodos que permitan un manejo eficiente [6], así como la complejidad de modelar los distintos niveles semánticos en el audio, desde el sonido ambiente, hasta los eventos sonoros o los efectos de audio. En este trabajo profundizamos en el reto de representar escenas para facilitar la identificación, o en su caso la generación, de registros de audio acordes a estas escenas y a sus representaciones.

Las nuevas funcionalidades de representación, tratamiento y generación de audio pueden permitirnos combinar varias modalidades y pensar en representaciones integrales, pasando de unas a otras de forma natural. Sin embargo, esto requiere superar el conocido “hueco de la modalidad” (*modality gap*), por lo que el procedimiento no resulta inmediato ni obvio. Además, los continuos avances en IA están favoreciendo la integración de distintas modalidades y sus combinaciones, así como la continua publicación de nuevos modelos entrenados. El trabajo con estas combinaciones de modalidades puede ser complejo y no siempre resulta sencillo monitorizar y asegurar un resultado de calidad.

La sonorización automática de escenas y secuencias de vídeo tiene multitud de aplicaciones dentro de la industria de la generación de contenidos [7], los videojuegos [8], la pre y la posproducción [9, 10], el desarrollo de ambientes inmersivos o en el cine [11], entre otros.

Este trabajo presenta un esquema automático de sonorización de escenas guiado por imagen que emplea algunos de los avances más recientes en inteligencia artificial. El esquema propuesto permite emplear tanto representaciones textuales como elemento intermedio (imagen a texto, y texto a audio), apoyándose en los modernos esquemas multimodales, como representaciones multimodales directas (imagen a audio).

Además de abordar la sonorización, el trabajo evalúa los resultados obtenidos en dos aspectos fundamentales. Por una parte, los sonidos deben ser de alta calidad, evitando efectos espurios y niveles de distorsión o de ruido que puedan resultar incómodos. Por otra parte, debe existir correspondencia y coherencia entre las distintas modalidades. En este sentido, hoy existen muy pocas métricas destinadas a este segundo análisis, y los autores no han identificado ningún trabajo anterior centrado en la sonorización de secuencias.

El resto del trabajo se ha estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el estado del arte, haciendo hincapié en las técnicas y modelos de representación multimodal, el aprendizaje contrastivo y las técnicas generativas. En la sección 3 presentamos el procedimiento de sonorización automática propuesto, desgranamos los detalles de cada uno de los módulos, del proceso de evaluación y de posibles alternativas sobre la estructura propuesta. En la sección 4 presentamos los materiales empleados para evaluar su funcionamiento, incluyendo los conjuntos de datos y los modelos empleados. En la sección 5 presentamos los experimentos diseñados, y en la 6 sus resultados. Las conclusiones y trabajos futuros se detallan en la sección 7.

2. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de los últimos años los sistemas automáticos de aprendizaje máquina han alcanzado cotas muy avanzadas en el manejo de representaciones. Particularmente, los esquemas profundos logran captar distintos niveles de representación y significación, conectando las distintas modalidades de los datos (imagen, texto, audio), empleando formas análogas para todas ellas [16]. Los llamados y conocidos *embeddings* son representaciones matemáticas a modo de vectores de números con múltiples dimensiones (habitualmente cientos o miles) que encierran en ellos información útil sobre los datos empleando representaciones más compactas (menor tamaño que los datos originales) y operables. Los llamados codificadores son componentes centrados en una o varias modalidades y entrenados para calcular estos *embeddings*. Su empleo nos permite trabajar en espacios de números con propiedades matemáticas, en lugar de hacerlo sobre píxeles de imagen o los valores de las muestras de audio.

En contrapartida, también se entrenan decodificadores, que nos devuelven del espacio numérico de los *embeddings* a las representaciones modales. Los esquemas convencionales obligan a que codificación y decodificación se desarrollen entre espacios de la misma naturaleza (imágenes, audio o texto). Sin embargo, los multimodales permiten transitar entre modalidades, pasando de imagen a texto, y de texto a audio, o directamente de la imagen al audio, por ejemplo.

La Fig. 1 muestra un esquema de codificación con dos modalidades, imagen (izquierda) y audio (derecha), en este caso. Cada una emplea un esquema de codificación y ofrece un vector de salida para sus N datos de entrada. En el centro de la figura superior aparece el aprendizaje contrastivo (*contrastive learning*), como estrategia para generar representaciones coherentes a las distintas modalidades. Este proceso de aprendizaje emplea datos no etiquetados y se centra en contrastar casos favorables frente a casos opuestos, permitiendo que el modelo aprenda diferencias intrínsecas entre las clases subyacentes.

Sin embargo, una de las claves del aprendizaje contrastivo es que de forma natural se observan diferencias intrínsecas en las representaciones de las distintas modalidades.

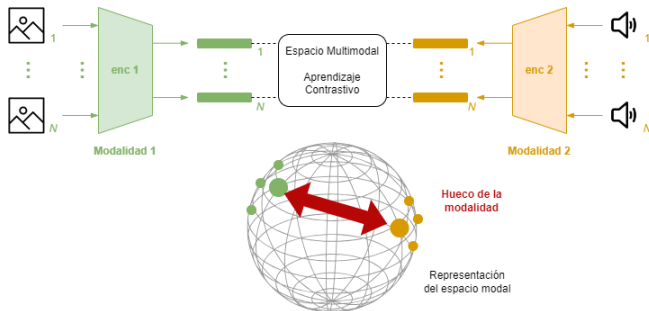


Figura 1 Esquema general de la codificación de dos modalidades. El resultado del aprendizaje contrastivo es una representación coherente entre ambas con un hueco entre los subespacios de las modalidades.

Este es el llamado *hueco de la modalidad* [12], que da nombre al vacío que se origina entre los subespacios de representación de las distintas modalidades. Así, las representaciones obtenidas para las distintas modalidades no coinciden perfectamente, ni su correspondencia es directa. Esto se ilustra en la parte inferior de la Fig. 1 donde se encuentran representados los vectores de datos dentro de un espacio de dimensión más elevada. La visualización emplea una esfera, emulando la hiperesfera que describe el espacio N -dimensional de los *embeddings* según reporta la literatura para algunos modelos empleados en este trabajo [13].

Hoy día existen multitud de esquemas de representación que emplean el aprendizaje contrastivo, o que integran módulos que hacen uso de él. Entre los ejemplos más representativos figuran CLIP (*Contrastive Language-Image Pre-training*) para imagen y texto [14], CLAP (*Contrastive Language-Audio Pre-training*), para texto y audio [15], o ImageBind, que integra representaciones para imagen, texto y audio [16]. Estos módulos integran esquemas de codificación coherentes entre sí, que evitan la necesidad de decodificar. Hacerlo así permite trabajar en el espacio de representación y operar en él, pero no nos ofrece una forma de recuperar los datos.

Son muchas las aplicaciones que se benefician de manejar estas versiones codificadas, y muy pocas las que nos permiten limitarnos a operar con ellos sin volver al espacio natural de los datos. En este trabajo, el proceso de sonorización guiado por imagen exige tomar imágenes a la entrada y entregar audio a la salida. Asimismo, se requiere evaluar los resultados a la vista de las entradas recibidas. Esto se ilustra en la Fig. 2.

Existen multitud de esquemas que generan representaciones modales en distintos espacios. En particular, CoCa (*Contrastive Captioners*) es un módulo diseñado para obtener descripciones textuales breves del contenido de imágenes [17]. Esto es, permite pasar de imagen a texto, empleando internamente las representaciones anteriores.

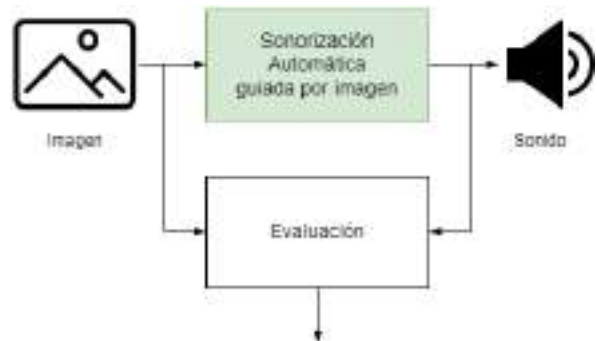


Figura 2 Esquema de la sonorización automática guiada por imagen, y de la evaluación de resultados.

A este se suman otros módulos, como los capaces de generar audio a partir de representaciones textuales. Un ejemplo de esquema generativo capaz de hacer esto es AudioLDM (*Audio Generation with Latent Diffusion Models*), que emplea modelos de difusión [18]. AudioLDM destaca por su capacidad para generar audio a partir de representaciones textuales, aprovechando modelos de difusión, lo que garantiza una alta calidad en la síntesis de voz. Su uso de modelos de difusión latente (*Latent Diffusion Models*) proporciona una mayor flexibilidad y realismo en la generación de audio a partir de texto.

Una de las preguntas más relevantes entorno a estos modelos generativos es la evaluación de su calidad y su coherencia. Dado un dato representado en su modalidad correspondiente (imagen, texto o audio) no es sencillo evaluar su calidad. La Fig. 2 ilustra una cuestión central en la evaluación de estos modelos generativos, y es la necesidad de definir la calidad objetiva con relación al grado de concordancia entre la imagen y el sonido, lo que plantea desafíos en la medición precisa de esta coherencia. Esta discusión se entrelaza con la necesidad de desarrollar métodos generativos efectivos que logren mantener un alto nivel de fidelidad y correlación entre los datos de diferentes modalidades.

Más allá de todo esto, en este trabajo enfrentamos un problema más a raíz del hueco entre modalidades. Anticipamos que la coherencia entre modalidades en la evaluación y validación de resultados plantea un importante desafío, que tiene su origen en la brecha existente entre las distintas representaciones modales.

Con todo esto, ya tenemos todas las piezas que integrarán los esquemas de sonorización de este trabajo. La Fig. 2 ilustra el doble reto que enfrentamos. De una parte, diseñamos el proceso de sonorización (arriba), que puede emplear módulos como los referidos; y de otra, definimos una evaluación que permita analizar sus resultados, a la vista de las entradas y las salidas (abajo). En este trabajo presentamos un esquema que nos permite afrontar ambos retos a la vez.

3. EL PROCEDIMIENTO DE SONORIZACIÓN AUTOMÁTICA

En este trabajo hemos considerado dos esquemas diferentes. Estos se ilustran en la Figura 3. Ambos esquemas se ajustan perfectamente a las necesidades anteriormente descritas, desde dos aproximaciones marcadamente diferentes. El de la arriba (Esquema 1), emplea un esquema puramente guiado por imagen y asigna audios ya disponibles en una base de datos, tal como lo haría un sistema de recuperación (*retrieval*) automático. Estos audios se tratan previamente y representan convenientemente, de forma que el proceso de sonorización se limita a asignar el audio más conveniente a cada imagen. El proceso requiere de un esquema de representación capaz de combinar imagen y audio (en este caso se propone ImageBind), y de una métrica de ranquin para la asignación, que debe ser coherente con la métrica de entrenamiento de las representaciones. En este caso, emplearemos la distancia y la similitud coseno.

El esquema de debajo en la Figura 3 (Esquema 2) se apoya en el texto y genera audio a partir de las representaciones textuales, que median entre la imagen y el audio. En este caso, empleamos CoCa, analizando la configuración más conveniente para obtener representaciones textuales del contenido (*prompts*) que resulten favorables para la correcta generación de sonidos. En este caso mediante AudioLDM. CoCa permite generar varias representaciones textuales, adaptando sus parámetros. AudioLDM permite generar variaciones de sonidos, con lo que, de facto, llegamos a un funcionamiento análogo al del Esquema 1, contando con la representación textual intermedia y capacidades generativas.

La motivación detrás de estos dos esquemas es simple. En primer lugar, ImageBind fue publicado muy recientemente, en mayo de 2023 [16] y ya permite alinear las distintas modalidades. Anteriormente esto no era posible y, sin embargo, el planteamiento general de la sonorización era igual. Además, el Esquema 1 carece de capacidades generativas y se centra en sonidos preexistentes. Esto añade un nivel de control adicional sobre el proceso de sonorización, pudiendo validar la calidad de los sonidos de antemano. Sin embargo, más allá de la sonorización, la originalidad y la novedad son aspectos muy relevantes en la generación de contenidos, y este esquema no los aborda. Por este motivo, en el Esquema 2 exploramos las capacidades

generativas como vía para enriquecer la experiencia multimodal de los usuarios. En este sentido, el papel modulador del texto en el segundo de los esquemas es crucial para controlar el proceso de generación. Trabajos futuros podrán considerar alternativas generativas que eviten pasar por la modalidad textual, tomando otras posibles entradas, por ejemplo, *embeddings* de imágenes. Una posible forma pasa por eliminar algunas etapas de los modelos existentes y/o entrenar transformaciones o transcodificadores.

Por último, volviendo sobre el proceso de evaluación de los resultados, ilustrado en la Figura 2, debemos analizar con cuidado el reto que se nos plantea. Partiendo de las entradas, en primer lugar, debemos asumir que éstas contienen información visual útil. Esto es, que muestran elementos o escenas más o menos habituales, que pueden estar incluidas en un proceso previo de entrenamiento más o menos agnóstico, como el que se emplea para los modelos anteriormente listados. Esto supone que, de facto, debemos buscar un mínimo nivel de calidad en las imágenes que representan escenas y al dominio, para asegurar que los resultados puedan ser coherentes. Algo similar sucede con los sonidos asignados o generados. La calidad de estos es uno de los factores más relevantes en la experiencia de los usuarios, y debemos asegurar un nivel suficiente, pero también de cara al correcto funcionamiento de los codificadores.

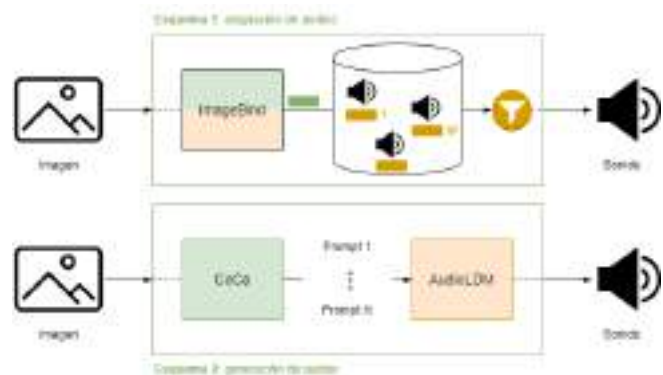


Figura 3 Esquema de las implementaciones propuestas para sonorización automática guiada por imagen.

En cuanto a la coherencia o consistencia entre las entradas y las salidas, esto es, entre la imagen mostrada y el sonido asignado o generado, en la sonorización de escenas la opinión y valoración de los usuarios en un aspecto fundamental. Por ello, hemos recabado las valoraciones subjetivas de una muestra preliminar según la escala MOS (*Mean Opinion Score*). Éstas nos permitirán evaluar la correspondencia entre las sonorizaciones resultantes y las imágenes de partida, e identificar criterios objetivos capaces de aproximar las valoraciones de los usuarios. En este sentido este trabajo también plantea nuevas métricas, centradas en la consistencia entre los *embeddings* multimodales y en la métrica interna del

espacio de representación, que comparamos con las valoraciones de los usuarios y la escala MOS.

La Fig. 4 resume las evaluaciones desarrolladas. La primera se centra en las evaluaciones subjetivas sobre la sonorización de distintas imágenes con distintos audios. Para la segunda y la tercera se emplea el espacio de representación de los *embeddings*, y se analiza tanto la consistencia en los *embeddings* como la distancia entre los mismos.

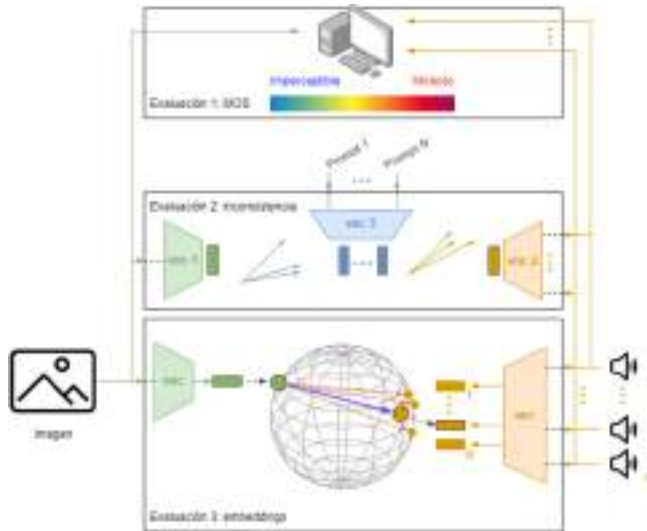


Figura 4 Esquema sobre las Evaluaciones realizadas sobre el proceso de sonorización automática.

En concreto, la segunda evalúa diferencias en las direcciones, siendo capaz de tratar las tres distintas representaciones (o potencialmente dos, si fuera el caso). Para ello, no requiere de ninguna información más que los *embeddings*. La tercera, se centra específicamente en las entradas y las salidas del proceso de sonorización tal y como se define en la Fig. 1. Para ello, analiza la distancia entre la representación proyectada de la imagen sobre el subespacio de sonidos, tomando en consideración el hueco entre modalidades y trabajando sobre las proyecciones de las direcciones en los distintos subespacios de representación. Este cálculo requiere referencias en los respectivos subespacios, que permitan observar las diferencias locales y así tratar mejor las diferencias entre vectores.

Las ecuaciones (1) y (2) describen las expresiones empleadas en las evaluaciones objetivas, Evaluación 2 y Evaluación 3, respectivamente. La Ec. 1 emplea la distancia y la similitud coseno y considera tres vectores diferentes para analizar las distancias entre los *embeddings* de imagen y texto, e_{imagen} y e_{text} , y los de imagen y audio, e_{imagen} y e_{audio} .

$$\text{inc} = 2 \times \text{DisCos}(e_{\text{imagen}}, e_{\text{text}}) - \text{DisCos}(e_{\text{imagen}}, e_{\text{audio}}) \quad (1)$$

Como es bien conocido, la distancia coseno se deriva de la llamada similitud coseno, que toma valores entre -1 y +1 cuando los vectores son idénticos, -1 cuando tienen sentidos opuestos y 0 si son vectores ortogonales. En consecuencia, la métrica de inconsistencia varía entre -1 y 2, donde 0 indica representaciones idénticas, 2 cuando imagen y texto son totalmente dispares, pero imagen y sonido coinciden, -1 cuando imagen y texto coinciden, pero imagen y audio son igualmente dispares, y +1 cuando las representaciones no coinciden entre sí.

Por otro lado, la ecuación Ec. 2 emplea la interpolación lineal esférica (SLERP, *spherical linear interpolation*) entre las representaciones para obtener una representación aproximada dentro del subespacio de otra modalidad.

$$e_{\text{audio}_t} = e_{\text{audio}} + \text{SLERP}(e_{\text{marco}}, e_{\text{marco}}; \theta) \quad (2)$$

Aquí, $e_{i\text{-audio}_t}$ se refiere al *embedding* del audio objetivo que correspondería al sonido deseable para sonorizar la imagen, $e_{0\text{-audio}}$ a un audio de referencia, $e_{j\text{-marco}}$ y $e_{0\text{-marco}}$ denotan las representaciones de las imágenes objetivas (las que se deben sonorizar) y la de referencia, respectivamente. Finalmente, θ es un parámetro utilizado en la función de Interpolación Lineal Esférica (SLERP, por sus siglas en inglés). Representa el peso asignado en la proyección esférica a la primera dirección con respecto a la segunda. En nuestro caso lo fijaremos a 0,5. En suma, esta interpolación permite ajustar la representación de audio a partir de la dirección de variación en un subespacio (en este caso, los *embeddings* de imagen), que se aplica en otro subespacio (aquí, el de los audios).

Finalmente, es importante destacar que los esquemas de sonorización propuestos constituyen un primer diseño centrado en el contenido estático de los marcos que componen el vídeo de una escena. Plantean importantes simplificaciones respecto a un caso completo al centrarse en los elementos estáticos de los marcos. La literatura describe ampliamente cómo las representaciones empleadas no son capaces de describir cambios o movimientos, que habitualmente están asociados con la acción y que, por tanto, cargados de significado. Sobre esta misma idea, tampoco son capaces de tratar variaciones temporales, como el inicio o el fin de esas mismas acciones, lo que impide la detección o la sincronización de eventos. Recientemente se han publicado algunos trabajos que abordan la problemática de la representación de vídeo [19]. Estos podrán servir de base a futuras investigaciones sobre la sonorización de acciones.

4. MATERIALES

Para la evaluación del flujo de sonorización diseñado hemos empleado secuencias de vídeos extraídas de un videojuego y de un *dataset* público [20], y otros descargados de la

plataforma Freesound [21], así como imágenes de pruebas extraídas de bases de datos disponibles en abierto [22].

Para estas pruebas elegimos el videojuego *The Elder Scrolls V: Skyrim*. Se trata de un ARPG (*Action Role-Playing Games*) del tipo mundo abierto desarrollado por Bethesda Game Studios, publicado por Bethesda Softworks en 2011 y que fue remasterizado en 2016, con nuevos gráficos y efectos renovados en versión multiplataforma. La historia se presenta en un universo con tintes, estética y narrativa medievales. Los efectos de sonido y la banda sonora son una referencia por su capacidad para complementar el contenido visual y para enriquecer la experiencia interactiva del juego.

El videojuego *Skyrim* ha sido estudiado en trabajos anteriores. Entre otros, Freitas [23] explora la relación de esta comunidad con la música, el sonido, la inmersión y la modificación de juegos en la serie de *Elder Scrolls*. Sobre esta base, investiga cómo las percepciones de los usuarios sobre la música en *Skyrim* y otros títulos de *Elder Scrolls* pueden haber influido en su compromiso personal con los juegos y con experiencias cada vez más inmersivas. Estas ideas refuerzan nuestro interés en la sonorización automática.

El *dataset* que se emplea en [20] contiene vídeos de 5 segundos de 10 categorías diferentes: tiro con arco, braza (estilo de natación), ballesta, baile, esquivar, vuelo, montar a caballo, paracaidismo, y agitar el arma. Hasta cinco de éstas, tiro con arco, montar a caballo, correr, braza y paracaidismo, se incluyen en el conjunto de datos UCF101 [24]. Desafortunadamente, cada categoría cuenta solo con 10 vídeos de 5 segundos cada uno y con una resolución de 320x180 a 30 cuadros por segundo. Por tanto, la calidad de imagen es baja y los materiales son muy limitados.

En vista de todo lo anterior, para este trabajo hemos optado por diseñar un nuevo *dataset* siguiendo los mismos criterios del trabajo anterior. En este caso, se han buscado vídeos de alta resolución y se han definido escenas que difieren no sólo en las acciones del personaje y publicados en plataformas en abierto. La Fig. 5 muestra ejemplos de las imágenes empleadas en las pruebas. Las imágenes a) y b) representan ejemplos de escenas diferentes del *dataset* de baja resolución original, mientras que c) y d) corresponden a escenas del nuevo. Por último, e) y f) son ejemplos tomados de fuera del dominio, y que contrastan con las anteriores por su contenido visual. Estas últimas las emplearemos al evaluar la capacidad del esquema de sonorización para distinguir muestras que se alejan de nuestro dominio de trabajo. En ese caso, esperamos que sus *embeddings* se sitúen en regiones alejadas de las correspondientes a las escenas a sonorizar. Eso mismo debe suceder con las representaciones de los sonidos, en función del grado de concordancia entre sus contenidos.

Sobre las secuencias a sonorizar, se extrajeron 18068 marcos de alta resolución (Full-HD, 1920x1080 píxeles) empleando la herramienta FFMPEG [25]. Se agruparon manualmente en once escenas diferentes atendiendo a su contenido. Además, se analizaron fragmentos de las escenas entorno a una imagen por referencia seleccionada para para la generación de textos alternativos. Se tomaron 10 marcos por delante y por detrás, trabajando sobre 21 imágenes, lo que finalmente arrojó un total de 4620 textos y se generaron sus correspondientes 4620 audios, uno por marco. En las pruebas preliminares realizadas sobre un único texto por imagen, este número de textos y registros de audio se redujo correspondientemente.



Figura 5 Capturas extraídas del *dataset* de *Skyrim*: a) y b) de baja resolución en escenas distintas, mientras c) y d) pertenecen al de alta resolución, en las escenas “Caminando por el bosque” y “Abriendo un cofre”, respectivamente. Por último, e) y f) son ejemplos tomados de otros dominios.

En cuanto a los audios para la evaluación, se extrajeron 100 ficheros de audio de la plataforma Freesound, realizando consultas semiautomáticas sobre términos preestablecidos, a la vista de la temática general del videojuego y del contenido visual de las escenas seleccionadas. Se trata de un conjunto limitado, pero que debe ser suficiente para evaluar el concepto de sonorización que presenta este trabajo.

5. EXPERIMENTOS

A continuación, describimos los cuatro experimentos desarrollados para la evaluación de la sonorización automática de las escenas de videojuego guiada por imagen. El proceso descrito sigue los pasos que ilustra la Fig. 4, empezando por la evaluación subjetiva sobre valoraciones de usuarios, la evaluación objetiva de la incoherencia a partir de la distancia coseno entre las distintas representaciones, y la evaluación objetiva a través de las proyecciones.

5.1. Evaluación subjetiva

Esta evaluación involucra participantes humanos que asignan calificaciones según la escala MOS (1 muy pobre, 5 excelente) para indicar su percepción subjetiva de la fidelidad del audio respecto a la imagen fuente. Se han seleccionado tres escenas del *dataset* de Skyrim: “Caminando por el bosque”, “Paseo junto al río” y una escena de “Abriendo un cofre”. De éstas, se extrajeron 63 cuadros y se generaron 63 sonidos, uno para cada cuadro, para la evaluación subjetiva.

La evaluación contó con siete evaluadores que recibieron recomendaciones básicas como el uso de auriculares, escuchar el audio de referencia para cada escena y familiarizarse con el sonido deseado, comparar el audio de referencia con cualquier audio generado para esa escena, y tomarse el tiempo suficiente para considerar cada muestra. Con todo, cada evaluación asignó una puntuación MOS por cada pareja cuadro-audio que le fue presentado.

5.2. Evaluación objetiva: distancia coseno

Esta prueba analiza las distancias entre *embeddings* de las diferentes modalidades involucradas. Buscamos cuantificar las disparidades entre las representaciones extremo a extremo (imagen a audio, según Esquemas 1 y 2 en Fig. 3) y analizar el papel mediador del texto (Esquema 2, misma figura). Proponemos la métrica de inconsistencia de la Ec. 1. De esta forma, podemos corroborar si las imágenes de entrada y los audios de salida ofrecen representaciones consistentes, que se asemejan entre sí, mientras evaluamos también la consistencia con el texto, para así identificar problemas subyacentes en las modalidades que afecten al esquema de sonorización propuesto. Además, esta forma de trabajar nos permite ordenar los resultados y seleccionar los ejemplos con menor distancia en absoluto para tener la mejor sonorización.

Empleamos las bases de datos de Skyrim, de alta y baja resolución y codificamos las representaciones con ImageBind, incluidas las correspondientes a 12000 subtítulos de CoCa y 12000 audios generados por AudioLDM: 20 descripciones y 20 audios asociados por cada marco. Calculando los valores de la métrica según Ec. 1, tomamos $k=10$ para evaluar los mejores resultados.

5.3. Evaluación objetiva: SLERP

Este enfoque permite tanto evaluar cómo distintas salidas de audio se asemejan a las referencias y así sonorizar una escena (Esquema 1 en Fig. 3), como una evaluación integral de la sonorización extremo a extremo y (también del Esquema 2 de la Figura). En este caso, empleamos ImageBind y la Ec. 2.

La función SLERP se ha evaluado tanto con fotogramas que pertenecen a la misma escena como con fotogramas de

escenas diferentes. En ambos casos, se emplea un valor de θ igual a 0,5. Además, al evaluar la proximidad entre representaciones se evaluaron las distancias coseno y euclídea (Ec. 3). Esto permite estudiar las diferencias entre las representaciones tanto en magnitud como en dirección.

$$\text{Distancia SLERP} = \text{dist}(e_{1\text{-audio}}, e_{1\text{-audio}_1}) \quad (3)$$

El resultado de esta función es un número que representa la distancia entre *embeddings*. El valor mínimo que puede obtener es cero, lo que indica que los *embeddings* son idénticos, esto es, que se superponen. Además, conforme a la Ec. 3 podemos ranquear los *embeddings* de los audios, considerando el más apropiado aquel, de entre un conjunto de posibles, que muestre la menor distancia.

Para esta evaluación empleamos la base de datos de alta resolución de Skyrim. Disponemos de 10 audios de referencia, los 11 marcos de referencia (uno por escena), las 231 marcos seleccionadas (las 10 anteriores y los 10 siguientes, respecto al de referencia), así como de los 4000 audios generados.

5.4. Estudio de la relación entre los distintos resultados de evaluación

Finalmente, analizamos los resultados de las evaluaciones subjetivas de los usuarios frente a los resultados obtenidos con las métricas objetivas anteriores. El objetivo es cuantificar la correlación entre ambas tomando como referencia las evaluaciones de los usuarios, y empleando la métrica objetiva para aproximar sus valoraciones.

Para ello, disponemos de más de 400 valoraciones, realizadas por de siete evaluadores distintos. Cada evaluación se compone de una terna de imagen, sonido, y una puntuación, acotada entre 5 (excelente) y 1 (malo), con cinco niveles. A estas ternas, les incorporamos los resultados de cada una de las evaluaciones objetivas. Para nuestro análisis estadístico, tomamos cada una de estas valoraciones como independientes, sin asumir nada sobre su distribución, y nos centramos en el coeficiente de correlación de Pearson entre las métricas previas y las valoraciones. En esta ocasión, evitamos considerar ningún tipo de modelo de relación entre las evaluaciones. Tampoco se han segmentado las entradas, ni las valoraciones. Trabajos futuros podrán considerar todas estas estrategias, así como modelos más complejos y entrenados para predecir unas evaluaciones a partir de otras.

6. RESULTADOS

Las figuras siguientes presentan los resultados de diversas evaluaciones en el orden en que se llevaron a cabo, como se detalla en la sección 5. En particular, la Figura 6 muestra las evaluaciones subjetivas utilizando la escala MOS para tres

escenas diferentes y los 21 audios evaluados en el Experimento 1.

Basándonos en la Figura 6, observamos lo siguiente:

1. Los evaluadores están generalmente de acuerdo en que el audio de la escena “Caminando por el bosque” es de alta calidad, con calificaciones por encima de 4.
2. Para la escena “Paseo junto al río”, también hay un consenso entre los evaluadores sobre la buena calidad del audio.
3. Sin embargo, el audio de la escena “Abriendo un cofre” recibe calificaciones más bajas, por debajo del valor 3. Esto podría deberse a que el modelo AudioLDM no fue entrenado con sonidos que se puedan asociar con la acción de abrir un cofre, lo que resulta en sonidos generados que se desvían de las expectativas.

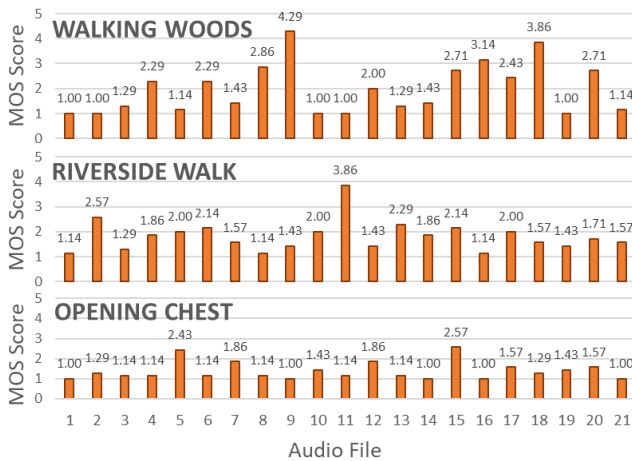


Figura 6 Resultado de la Evaluación 1 para las tres escenas.

Otra forma de analizar los resultados permite considerar la distribución estadística de las valoraciones. En la tercera escena todos los valores son bajos, mientras que en las dos primeras un subconjunto de los registros obtuvo buenas valoraciones respecto al resto. Un estudio más amplio requerirá incrementar el tamaño del conjunto de audios a considerar, aumentando su riqueza y variabilidad. Asimismo, cabe considerar registros con distintos niveles de calidad, a fin de asegurar que la sonorización cubra las expectativas de los usuarios.

En cuanto a la Evaluación 2, al calcular la distancia del coseno para la métrica de Inconsistencia, Ec. 2, los resultados de las distancias entre los *embeddings* de imagen y texto (ver Fig. 7.a) y los *embeddings* de imagen y audio (ver Fig. 7.b) se acercan a 1 para el *dataset* de baja resolución. Esto indica un alto grado de disimilitud o una relación casi opuesta entre los vectores que se están comparando. En otras palabras, no ha captado ninguna relación entre el contenido visual y el

texto o audio asociados. Esto resulta lógico a la vista de la calidad de las imágenes en este conjunto ver Fig. 5.a y 5.b.

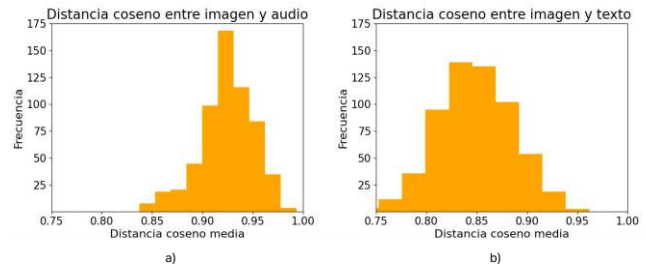


Figura 7 Histogramas de distancias correspondientes a la Evaluación del *dataset* 2: baja resolución. Las diferencias son pequeñas y los valores bajos.

Vistas estas posibles limitaciones, se repitieron las pruebas sobre el conjunto de imágenes de alta resolución (Fig. 5c y 5d, por ejemplo), obteniéndose unos nuevos histogramas marcadamente diferentes a los de la Fig. 7. Estos se muestran en la Fig. 8.

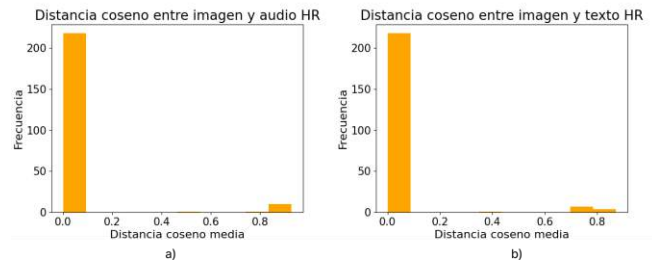


Figura 8 Histogramas de distancias correspondientes a la Evaluación 2 para secuencias de alta resolución. Las diferencias son mayores y los valores más altos que en Fig. 7.

En lo que respecta a la tercera evaluación, se llevaron a cabo pruebas similares a las realizadas anteriormente. Sin embargo, en este caso, se centraron en las representaciones generadas para los archivos de audio y los fotogramas de las secuencias de imágenes, utilizando los codificadores modales de ImageBind.

Tabla 1. Tabla de la similitud entre pares modales correspondiente a la Evaluación 3.

Par audio	Par imagen	Media	Desviación típica
No relacionado	Relacionado	24,9	2,5
No relacionado	No relacionado	24,7	2,5
Relacionado	No relacionado	12,5	3,2
Relacionado	Relacionado	12,5	3,2

La tabla presenta una evaluación por modalidad (audio e imagen) de los pares referencia-objetivo, y evalúa la relación de similitud que existe entre ellos. Esta relación se basa en la

Ec. 2. En este contexto, los pares se dividen en dos categorías: “No relacionado” (objetivo alejado de la referencia) y “Relacionado” (objetivo próximo a la referencia).

Cuando los pares guardan relación, sus distancias se encuentran en el rango aproximado de 12,5. Esto sugiere similitud o relevancia entre los objetivos y sus referencias correspondientes. Por el contrario, los pares que no están relacionados con la referencia a la que se comparan presentan distancias mucho más elevadas, superando 24 unidades. Esto indica una notable disimilitud y falta de relevancia entre objetivos y referencias.

Por otro lado, cuando los pares son etiquetados como “Relacionado” (lo que implica que la imagen y el audio están próximos en sus representaciones multimodales), la métrica de Evaluación 3 arroja un valor medio de 12,5, con una desviación típica de 3,2. Esto sugiere que, en promedio, cuando existe una relación entre la imagen y el audio, la métrica produce un valor menor que en el caso de “No relacionado”. Esta medición tiende a ser más variable, lo que podría reflejar la diversidad de grados de relación entre los elementos evaluados.

En última instancia, comparamos los resultados de las valoraciones subjetivas obtenidas en la Evaluación 1 con los datos objetivos de las Evaluaciones 2 y 3. Al igual que en las pruebas objetivas, los experimentos subjetivos abarcan todo el rango de resultados posibles. Esto respalda la idea de que la métrica objetiva y las percepciones subjetivas son coherentes. Finalmente, la Tabla 2 presenta el coeficiente de correlación de Pearson para cada uno de los experimentos subjetivos, así como su promedio.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson de los experimentos subjetivos y la métrica objetiva de SLERP sobre los experimentos de la Evaluación 1.

Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Media
-0,73	-0,19	-0,29	-0,40

Basándonos en estos resultados, queda claro que hay una relación entre las métricas objetivas y las valoraciones subjetivas. En particular, se observa una correlación negativa entre la distancia de los *embeddings* y la evaluación subjetiva de los participantes. Planeamos expandir este estudio con más evaluaciones subjetivas para confirmar esta observación clave. Además, estos hallazgos respaldan la idea de dirigir futuras investigaciones hacia nuevas áreas, como estudios que comiencen con representaciones multimodales, en lugar de enfocarse únicamente en las representaciones modales iniciales.

7. CONCLUSIONES

Hemos logrado implementar y evaluar dos esquemas completos de sonorización automática empleando representaciones multimodales resultantes del aprendizaje contrastivo. Para ello, hemos integrado modelos pre-entrenados descritos en la literatura más reciente.

Además, hemos validado los resultados obtenidos mediante pruebas subjetivas desarrolladas con usuarios. Estos se han contrastado con las métricas objetivas propuestas, centradas en considerar la consistencia entre las imágenes ofrecidas y los audios generados o asignados, respectivamente. En conclusión, el esquema de sonorización propuesto es capaz de identificar los sonidos más apropiados para sonorizar una imagen de entre un conjunto dado, y generar audios coherentes con los marcos de video siempre que la resolución sea suficiente.

El código para calcular la métrica de distancia de incrustación, que mide la distancia entre un audio de referencia y un audio generado, está disponible en GitHub.

Como trabajos futuros, se está trabajando en el diseño de una página web que permita experimentar el esquema propuesta de forma libre, escuchar y evaluar los resultados, incorporando aspectos de la calidad del sonido (fidelidad, ruido, etc.). También se quiere evaluar la relación entre las métricas obtenidas y las métricas que emplea Freesound para ordenar la relación entre registros, y entrenar un esquema generativo completo que permita evitar la etapa intermedia de texto. Esto último va a requerir nuevas evaluaciones y experimentos, que permitan contrastar sus resultados conforme a las distintas métricas propuestas.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado conjuntamente por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España dentro del proyecto PID2021-128469OB-I00, el Programa de Investigación e Innovación de la Unión Europea Horizon 2020 dentro del “Grant Agreement No. 101003750”. Las becas de investigación de María Sánchez y Laura Fernández han sido financiadas por Amazon dentro de la colaboración IPTC-Amazon.

9. REFERENCIAS

- [1] Morten Roar Berg. Our visual focus (part 2) – the eye versus the ear. <https://www.acousticbulletin.com/our-visual-focus-part-2-the-eye-versus-the-ear/>. Updated 2020. Accessed Sep 11, 2022.
- [2] Reddy MDM, Basha MSM, Hari MMC, Penchalaiah MN. Dalle: Creating images from text. UGC Care Group I Journal. 2021;8(14):71-75.

- [3] Sheffer R, Adi Y. I hear your true colors: Image guided audio generation. 2023:1-5.
- [4] Iashin V, Rahtu E. Taming visually guided sound generation. arXiv preprint arXiv:2110.08791. 2021.
- [5] Huang R, Huang J, Yang D, et al. Make-an-audio: Text-to-audio generation with prompt-enhanced diffusion models. arXiv preprint arXiv:2301.12661. 2023.
- [6] Steinmetz CJ, Reiss JD. Efficient neural networks for real-time analog audio effect modeling. arXiv preprint arXiv:2102.06200. 2021.
- [7] Amato G, Behrmann M, Bimbot F, et al. AI in the media and creative industries. arXiv preprint arXiv:1905.04175. 2019.
- [8] Collins K. Game sound: An introduction to the history, theory, and practice of video game music and sound design. Mit Press; 2008.
- [9] Christian AJ. Expanding production value: The culture and scale of television and new media. *Critical Studies in Television*. 2019;14(2):255-267.
- [10] 344 Audio Limited. Company. The ultimate guide to audio post production & sound design part 1. <https://www.344audio.com/post/the-ultimate-guide-to-audio-post-production-sound-design>. Updated 2023. Accessed Nov 23, 2021.
- [11] Andersen A. How to get your game audio pipeline right – workflows, organization and the tools you need. Updated 2020. Accessed Sept, 2023.
- [12] Liang VW, Zhang Y, Kwon Y, Yeung S, Zou JY. Mind the gap: Understanding the modality gap in multi-modal contrastive representation learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2022;35:17612-17625.
- [13] Shi P, Welle MC, Björkman M, Kragic D. Towards understanding the modality gap in CLIP. 2023.
- [14] Radford A, Kim JW, Hallacy C, et al. Learning transferable visual models from natural language supervision. 2021:8748-8763.
- [15] Wu Y, Chen K, Zhang T, Hui Y, Berg-Kirkpatrick T, Dubnov S. Large-scale contrastive language-audio pretraining with feature fusion and keyword-to-caption augmentation. 2023:1-5.
- [16] Girdhar R, El-Nouby A, Liu Z, et al. Imagebind: One embedding space to bind them all. 2023:15180-15190.
- [17] Yu J, Wang Z, Vasudevan V, Yeung L, Seyedhosseini M, Wu Y. Coca: Contrastive captioners are image-text foundation models. arXiv preprint arXiv:2205.01917. 2022.
- [18] Liu H, Chen Z, Yuan Y, et al. Audioldm: Text-to-audio generation with latent diffusion models. arXiv preprint arXiv:2301.12503. 2023.
- [19] Yang Y, Ma J, Huang S, et al. TempCLR: Temporal alignment representation with contrastive learning. arXiv preprint arXiv:2212.13738. 2022.
- [20] Luo Z. ES5-skyrim-human-actions. Updated 2018. Accessed Sept, 2023.
- [21] Fonseca E, Pons Puig J, Favory X, et al. Freesound datasets: A platform for the creation of open audio datasets. 2017.
- [22] The elder scrolls V: Skyrim [PC] | gameplay (no comments). Updated 2017. Accessed Sept, 2023.
- [23] Freitas J. A (silent) game of words: Notes on jeremy soule’s accusations and the elder scrolls online community. *Journal of Sound and Music in Games*. 2022;3(1):50-59.
- [24] Soomro K, Zamir AR, Shah M. UCF101: A dataset of 101 human actions classes from videos in the wild. arXiv preprint arXiv:1212.0402. 2012.
- [25] FFmpeg Developers. FFmpeg. Updated 2017. Accessed Sept, 2023.

ACOUSTIC LOCALIZATION OF UAVS WITH MICROPHONE ARRAYS. COMPARISON OF DIFFERENT ARRAY GEOMETRIES.

Diana Tejera Berengué, FangFang Zhu Zhou, Manuel Utrilla Manso, Roberto Gil Pita, Manuel Rosa Zurera^{1}*

¹Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior.
Campus Universitario, Universidad de Alcalá
28805 Alcalá de Henares, Madrid

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio sobre detección y localización de UAVs utilizando arrays de micrófonos con diferentes geometrías. El estudio se basa en el resultado del análisis espectral de las señales emitidas, que permite identificar las bandas de frecuencia con mayor energía, y características especiales que pueden ser consideradas en el diseño del array de micrófonos. Para probar las diferentes geometrías con las mismas señales, se ha creado un modelo de señal de las señales emitidas por UAVs en movimiento en trayectorias controladas. Este modelo nos permite generar señales sintéticas para probar los algoritmos de localización. En el estudio se han considerado arrays lineales uniformes y arrays circulares, con diferente número de micrófonos y diferentes distancias entre micrófonos. Cada geometría tiene propiedades que pueden dificultar la estimación de la dirección de llegada en diferentes escenarios, y facilitarla en otros. El algoritmo de localización trabaja con tramas, cuya longitud es otro de los parámetros considerados en el estudio. Este estudio se realiza con tres drones cuadricópteros y un helicóptero no tripulado, demostrando que es posible una estimación precisa a distancias de cientos de metros del UAV con drones en movimiento, aunque el uso de micrófonos precisos y algoritmos más potentes augura la ampliación de este rango a distancias mayores.

ABSTRACT

This paper presents a study of UAVs detection and localization using microphone arrays with different geometries. The study is based on the result of the emitted signals spectral analysis, which allows to identify the frequency bands with most of the energy, and special features that can be considered in the microphone array design. To test the different geometries with the same signals, a signal model

of the signals emitted by moving UAVs in controlled trajectories has been created. This model allows us to generate synthetic signals for testing the localization algorithms. Uniform linear arrays and circular arrays, with different number of microphones and different inter-microphone distances, have been considered in the study. Each geometry has properties which can makes estimation of the direction of arrival difficult in different scenarios, and easier in others. The localization algorithm works with frames, which length is another parameter considered in the study. This study is performed with three quadcopter drones and one unmanned helicopter, demonstrating that accurate estimation is possible at distances of hundreds of meters from the UAV with moving drones, although the use of precise microphones and more powerful algorithms portends the extension of this range to greater distances.

Palabras Clave— Localization, detection, arrays, microphones, UAV.

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (“Unmanned Aerial Vehicles”, UAV) representan una de las tecnologías más populares de las últimas décadas, debido a su amplia gama de aplicaciones, así como a su flexibilidad y coste moderado [1]. Se han utilizado para cometer actos ilícitos relacionados con la ciberseguridad, la privacidad y la seguridad pública [2]. La necesidad de detectar UAVs abrió una línea de investigación que se ha desarrollado a lo largo de las dos últimas décadas, proponiéndose diversas técnicas basadas en diferentes tipos de sensores y algoritmos de procesado de señal [3].

Los métodos desarrollados adolecen de varios inconvenientes y, hasta la fecha, no existe una solución universal que pueda aplicarse en todos los escenarios posibles. Las técnicas de inspección visual con cámaras,

* **Autor de contacto:** manuel.rosa@uah.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

requieren una línea de visión clara, lo que no es posible en escenarios lluviosos, con niebla, o en presencia de obstáculos que produzcan ocultación. Las cámaras utilizadas pueden ser convencionales o de infrarrojos, pero en este último caso el coste puede ser elevado. La detección basada en radiofrecuencia trata de detectar las señales de comunicación utilizadas por los drones con antenas adecuadas. Puede ser una técnica eficaz, si el UAV se comunica con una estación de control o con otros UAVs, pero inútil con UAVs autónomos. La detección con sensores de radar, activos o pasivos, ha demostrado su eficacia y no se ve afectada por las condiciones de visibilidad, por ejemplo. Tienen una gran fiabilidad y sensibilidad, pero las técnicas de procesamiento que utilizan los hacen ineficaces para detectar drones estáticos o que se mueven a baja velocidad. Además, su coste puede ser muy elevado para muchas aplicaciones. Así, surge la detección acústica, como una alternativa en muchos escenarios, que puede complementar satisfactoriamente a los sistemas anteriores.

La detección acústica de vehículos con rotores se lleva a cabo en una serie de pasos, tratando en primer lugar de caracterizar la señal acústica y utilizando los resultados para diseñar el mejor sistema de sensores. Posteriormente debe seleccionarse el algoritmo más adecuado para estimar la dirección de llegada (DOA) de la fuente sonora. Con este fin se han utilizado el conformador de haz de respuesta sin distorsión de varianza mínima (“Minimum Variance Distorsionless Response”, MVDR) [4] o el algoritmo de clasificación de señales múltiples (MUSIC) [5]. Estos algoritmos procesan las señales adquiridas por un array de sensores acústicos (micrófonos).

Los arrays más utilizados son los lineales uniformes (ULA) [3][4], aunque también se han utilizado otras geometrías como un array tetraédrico [6]. Los ULA permiten estimar la dirección de llegada (DoA) con precisión en acimut o elevación. Si el array lineal se coloca en el plano horizontal, existe incertidumbre en la estimación de acimut. Si se coloca verticalmente, puede existir incertidumbre en la estimación de la elevación. La incertidumbre puede desaparecer si se plantean restricciones a las DoA, de forma que algunas no estén permitidas.

Como alternativa, en este trabajo evaluamos el uso de un array circular uniforme (UCA) para estimar la elevación y el acimut simultáneamente. La detección 3D se completaría con la estimación del alcance, para lo que sería necesaria la colaboración de al menos dos arrays de sensores acústicos. Este estudio queda fuera del alcance de este trabajo.

El artículo se organiza de la siguiente forma. En la Sección 2 se caracteriza la señal acústica de varios drones, con el fin de conocer cómo se distribuye la energía en el dominio de la frecuencia y determinar la existencia de una banda predominante que pueda ser utilizada para la estimación de DoA con algoritmos de banda estrecha. Además, se estudian técnicas de procesamiento de array para determinar las características del array de micrófonos a

utilizar. En la Sección 3 se describe el algoritmo, basado en conformación de haz, utilizado para llevar a cabo la estimación de los ángulos de acimut y elevación, considerando fenómenos como la reverberación, la atenuación y el desplazamiento Doppler cuando el dron está en movimiento. En la Sección 4 se presentan los resultados, con el valor del error cuadrático medio (RMSE) del ángulo DoA como métrica. Finalmente, la Sección 5 contiene las conclusiones del estudio.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL ACÚSTICA

2.1. Características de la señal acústica emitida por un UAV

El sonido producido por los UAV se origina principalmente en los motores y las palas debido a su rotación. Diferentes motores pueden girar a diferente velocidad angular, lo que daría lugar a un sonido compuesto que no es armónico. Además, si hay aceleración, la velocidad de rotación de las palas cambia. La caracterización de las señales de audio generadas por los UAV es necesaria para el correcto diseño de los sistemas de detección y localización. La señal es generalmente no estacionaria si el UAV está en movimiento, produciendo variaciones de la distribución de energía en el dominio de la frecuencia.

En el dominio de la frecuencia, se observan distintos patrones que pueden ser útiles para la detección de vehículos aéreos no tripulados. Por un lado, la energía se concentra en bandas de frecuencia características, asociadas a las velocidades de rotación medias para la sustentación y el movimiento, residiendo la mayor parte de la energía en baja frecuencia. Por otro lado, la envolvente del espectro presenta picos y valles, resultantes de las señales combinadas de los motores y las palas. Estos picos y valles aparecen aproximadamente equiespaciados y las frecuencias a las que se producen tienen una variación lenta en la práctica. Estas frecuencias y la forma del espectro envolvente están relacionadas con el tipo de UAV, proporcionando información valiosa a efectos de detección, clasificación e identificación.

Estableciendo una analogía con el espectro de las señales de voz, debido al comportamiento pseudo-armónico, se ha utilizado el *análisis cepstral* para extraer el valor de la frecuencia más baja con un pico de energía:

$$C(qft) = \mathcal{F}^{-1}\{\log_{10}(\mathcal{F}(s(t)))\} \quad (1)$$

$$C(qft) = \Re\left\{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log_{10}|S(\Omega)|e^{j\Omega n} d\Omega\right\} \quad (2)$$

donde $\mathcal{F}(s(t))$ representa la transformada de Fourier de la señal $s(t)$, y qft representa la “*quefrecy*”, medida en unidades de tiempo. Concretamente, trabajamos con el cepstrum real, que se calcula como la transformada de Fourier inversa del espectro de amplitud. Si la señal es real, el módulo de la transformada de Fourier es real y tiene simetría par, y el

cepstrum real también será real. Sin embargo, en la práctica, el cálculo de las transformadas directa e inversa puede producir un residuo complejo, que debe eliminarse. El *cepstrum* permite identificar la frecuencia con el pico de energía más alto del espectro. En la Figura 1 se presenta un ejemplo.

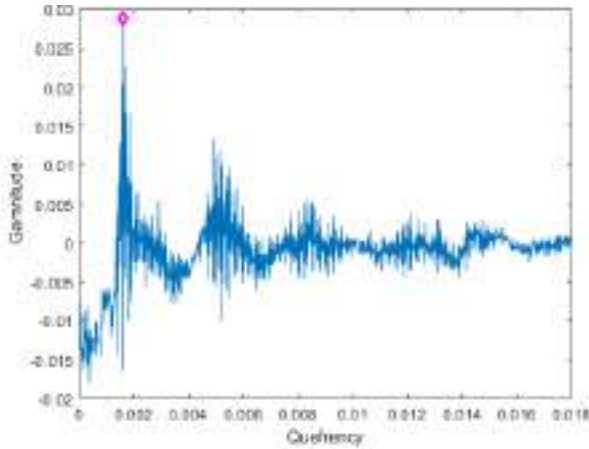


Figura 1. Análisis cepstral de la señal emitida por un cuadricóptero QAV400.

2.2. Arrays de sensores acústicos

La estimación de la dirección de llegada, necesaria para la localización de la fuente sonora, se realiza usando las señales adquiridas con un array de micrófonos con una geometría adecuada. Para mostrar los fundamentos del procesado en array, suponemos un array con M micrófonos idénticos. Cuando hay P fuentes sonoras que generan ondas planas en el área bajo observación, el vector \mathbf{x}^T con todas las señales que llegan a los micrófonos se puede expresar con notación matricial de la siguiente forma:

$$\mathbf{x}^T(t) = \mathbf{A}(\theta, \varphi)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (3)$$

donde $\mathbf{s}^T(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_P(t)]$ es el vector con las fuentes sonoras, $\mathbf{n}^T(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]$ es el vector con las contribuciones de ruido en los micrófonos, la matriz $\mathbf{A}(\theta, \varphi) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)]$ es la *matriz de direcciones de llegada* (DOA) con vectores $\mathbf{a}(\theta_i)$ definidos de la siguiente forma:

$$\mathbf{a}^T(\theta_i) = [e^{j\xi \cos(\theta-\theta_1)}, e^{j\xi \cos(\theta-\theta_2)}, \dots, e^{j\xi \cos(\theta-\theta_n)}] \quad (4)$$

siendo $\xi = kr \sin(\varphi)$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\lambda = \frac{c}{f}$, y f la frecuencia. El par (θ, φ) se forma con los valores de acimut y elevación, y r es el radio de la circunferencia si se considera un array circular. Para esta configuración, el factor de array viene dado por la siguiente expresión:

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_n e^{jkr \sin(\varphi) \cos(\theta-\theta_n)} \quad (5)$$

$|AF(\theta, \varphi)|$ define la directividad. El ancho de haz de un array uniforme con N elementos, separados una distancia d , a la frecuencia f (Hz), se calcula con la siguiente expresión:

$$BW = \frac{2c}{Ndf} \quad (6)$$

Para evitar la aparición de réplicas del lóbulo principal, la distancia d entre micrófonos debe ser menor que la mitad de la longitud de onda, a la frecuencia considerada. Se ha seleccionado una distancia entre micrófonos $d=40cm$, que cumple esta condición para $f < 425Hz$, que es suficiente, teniendo en cuenta que la potencia de la señal se concentra en baja frecuencia. Para los resultados que se presentan, el número de micrófonos se ha fijado a $N=8$, que da lugar a un ancho de haz $BW=0.5$ rad, para $f=425Hz$.

3. ESTIMACIÓN DEL ÁNGULO DE LLEGADA

Se han considerado arrays lineales y uniformes. La distancia entre sensores adyacentes es $d=40cm$, para evitar la aparición de réplicas del lóbulo principal, como se ha mencionado previamente. El array de sensores se posiciona un metro y medio sobre el suelo, de forma que se considerará un efecto de reverberación del 30%.

El algoritmo de localización proporciona una estimación del DOA en acimut y elevación cada medio segundo, lo que supone procesar 4000 muestras, si la frecuencia de muestreo es de 8kHz (se ha seleccionado esta frecuencia de muestreo porque en el dominio de la frecuencia hay información útil hasta 4 kHz como máximo).

En este trabajo utilizamos algoritmos de banda estrecha para estimar la dirección de llegada, aplicados a bandas centradas en múltiplos de la frecuencia estimada con el procedimiento descrito en el subapartado II.A. El algoritmo para estimar el DOA es el siguiente:

- Se estima la frecuencia con un máximo de energía (f_{fund}) aplicando el análisis cepstral descrito en el apartado II.A. El algoritmo de estimación del ángulo de llegada (DOA) de banda estrecha se aplica a las bandas centradas en f_{fund} , y los primeros seis múltiplos de la misma, $n \cdot f_{fund}$, $n = 2, \dots, 7$, porque por encima de la banda que abarca a estas frecuencias la energía es relativamente baja. Alrededor de cada múltiplo de f_{fund} , se busca el pico del espectro de amplitud en una ventana de 50 muestras en frecuencia de la transformada discreta de Fourier (DFT), considerando que es posible que el máximo en el espectro de amplitud en esa banda no coincida con el múltiplo de f_{fund} .
- Una vez que se han obtenido esos valores, se eligen cinco componentes frecuenciales alrededor de las frecuencias para las que hemos obtenido los picos en el espectro de amplitud, dando lugar a un total de 35 componentes frecuenciales. Este procedimiento evita el barrido de frecuencias, que requeriría un mayor tiempo de procesamiento, y minimiza el impacto de otras fuentes sonoras presentes en la escena acústica, que pueden tener

una elevada potencia en bandas de frecuencia no utilizadas.

- c) A efectos de evaluación, se ha construido una malla de ángulos de acimut y elevación, con una separación de 2° en ambas dimensiones.
- d) Para estimar la posición del UAV, se calcula la respuesta del formador de haz MVDR en las frecuencias de interés para cada punto de la rejilla. El ángulo estimado corresponde al formado entre el punto de la rejilla con máxima respuesta y el centro del array, con el eje correspondiente, promediando seis estimaciones consecutivas.

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Esta sección describe los experimentos realizados y los principales resultados obtenidos, mediante simulaciones, pero en un escenario realista. El experimento realizado para generar las señales se describe en los siguientes pasos:

- a) El array de micrófonos se considera centrado en el origen de coordenadas. El estudio trata de determinar la posibilidad de detectar UAVs en movimiento y estimar la dirección de llegada en acimut y elevación
- b) Se utilizan grabaciones de señales de audio reales, obtenidas con diferentes tipos de UAVs, todos ellos en reposo [2]. Para los resultados presentados en este trabajo, las señales generadas por los UAVs se han escalado para simular un nivel de presión sonora (SPL) medio de 80dB.
- c) El fenómeno de atenuación se ha caracterizado con las normas ISO 9613-1 [8] y 9613-2 [9], de forma que la atenuación de la señal recibida varía en función de la frecuencia y de la distancia fuente-receptor (Figura 2). Para calcular esta atenuación, se ha elegido un paso de frecuencia de aproximadamente 3,9 Hz. La atenuación resultante se ha aplicado en el dominio de la frecuencia a tramas de 1000 muestras.

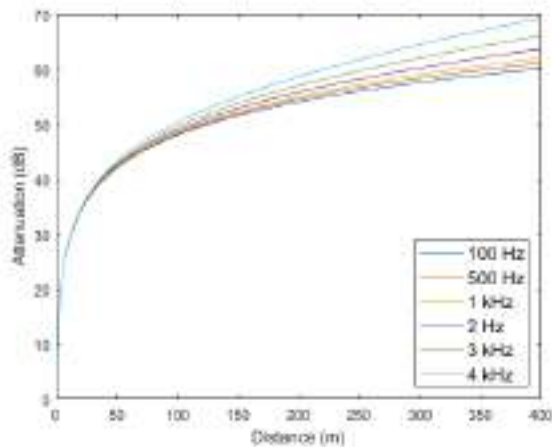


Figura 2. Atenuación dependiente de la frecuencia, en función de la distancia.

- d) El movimiento del UAV se modela generando desplazamientos Doppler, según la dirección del movimiento. El movimiento descrito por el UAV es lineal y paralelo al suelo, en una maniobra que consiste en acercarse y luego alejarse, de forma que la elevación es máxima cuando el ángulo acimutal es mínimo. La posición inicial del UAV viene definida por el vector $\mathbf{r}_0 = [20, y_0, 10]^T$ (m), donde y_0 es variable, dependiendo del experimento a realizar. El vector velocidad viene definido por $\mathbf{v} = [0, v_y, 0]^T$ (m/s). El vector posición en cada instante de tiempo viene determinado por la ecuación del movimiento rectilíneo uniforme: $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v} \cdot t$. La representación de las variaciones de los ángulos de acimut, elevación y distancia, para la maniobra de movimiento descrita, se muestra en la Figura 3.

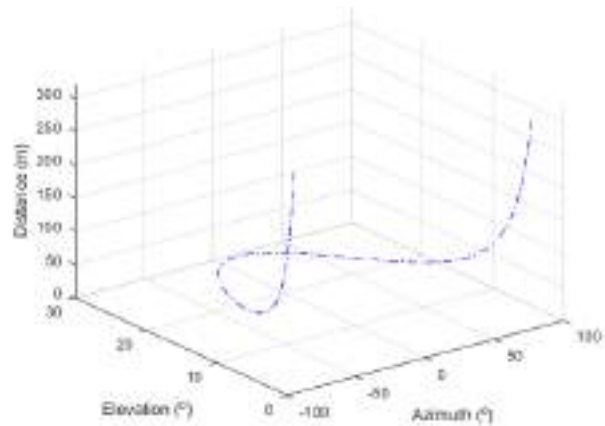


Figura 3. Movimiento simulado del UAV: Acimut, elevación y distancia al centro del conjunto de micrófonos.

- e) En el entorno se encuentra una fuente ruidosa que genera ruido de banda ancha (ruido blanco) con un nivel de 40 dB SPL en la posición de los micrófonos. La señal de ruido generada interfiere con la señal de interés, y la relación señal/ruido (SNR) es inferior a 0dB cuando la distancia de la fuente a los sensores es superior a 50m, aproximadamente.

A modo de ejemplo, se muestran los valores del error cuadrático medio (RMSE) en la estimación de los ángulos de acimut y elevación, para el cuadricóptero AirRobot AR-100, cuando se mueve a una velocidad de 50 m/s (los resultados obtenidos con otros UAVs son similares). En la Figura 4 se observa que los errores obtenidos en la estimación de DOA en acimut y elevación son mayores a medida que aumenta la distancia, debido principalmente al efecto de la atenuación sufrida por la señal. No obstante, se observa que la precisión en la estimación apenas varía hasta que la distancia entre el UAV y el array de micrófonos es superior a 300m, distancia a la cual la SNR es negativa.

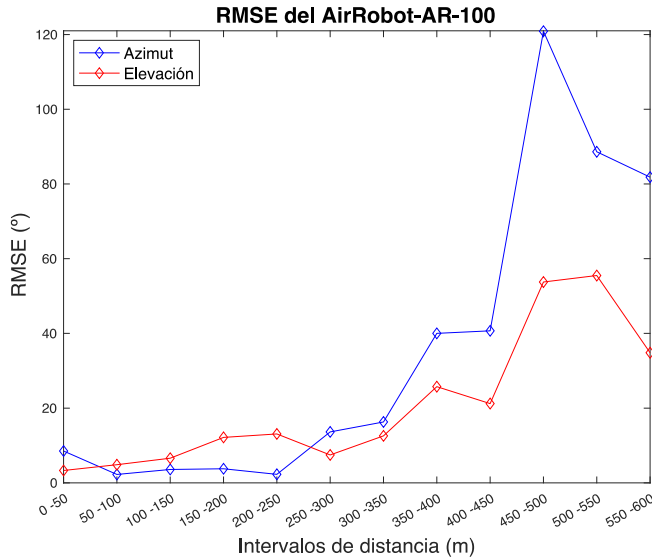


Figura 4. Valor cuadrático medio del error en la estimación de los ángulos de acimut y elevación, para un drone AiRobot-AR-100, en un entorno con ruido de 40dB SPL, con una array circular.

También se presentan los resultados obtenidos con un array lineal (Figura 5). Se observa que los resultados son comparables a los obtenidos con arrays circulares. Debe considerarse que este entorno es incluso desfavorable, puesto que aún con la presencia de ruido de fondo, la conformación de haz necesaria para el apuntamiento del array en las distintas direcciones permitirá atenuar la potencia de ruido mediante filtrado espacial, haciendo la localización más fiable.

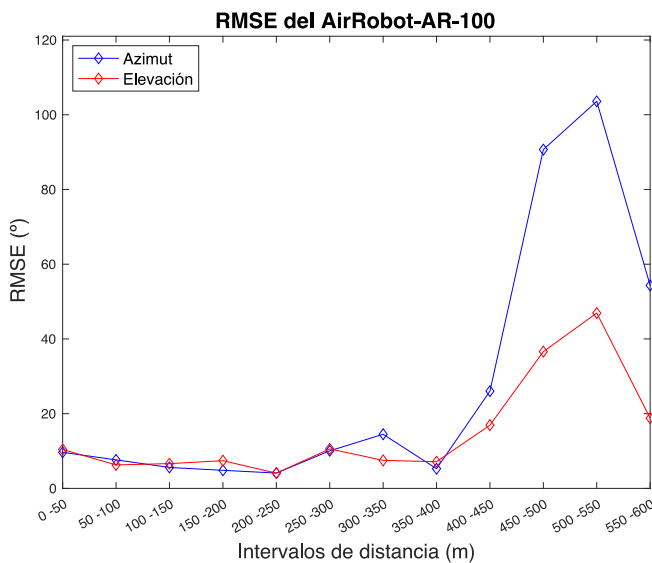


Figura 5. Valor cuadrático medio del error en la estimación de los ángulos de acimut y elevación, para un drone AiRobot-AR-100, en un entorno con ruido de 40dB SPL, con una array lineal.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo se ha presentado un estudio para evaluar la posibilidad de localizar la posición de UAVs usando arrays de micrófonos. Se han estudiado arrays lineales y circulares, tratando de evaluar la precisión en la estimación de la dirección de llegada de la onda sonora. Para el estudio, se ha estudiado la señal emitida por distintos tipos de UAVs, demostrándose que la potencia se emite fundamentalmente en baja frecuencia, y que si bien no tiene características pseudo-periódicas por estar formada por la suma de señales generadas por rotores que pueden girar a frecuencias diferentes, sí que observamos una estructura que es comparable al espectro de la señal de voz, con picos y valles. Por esta razón, se ha adoptado el análisis homomórfico (cepstrum), para estimar la frecuencia a la que obtenemos un pico de energía en la frecuencia. Esta frecuencia se ha tomado referencia para el diseño del array.

Para probar las diferentes geometrías con las mismas señales, se ha creado un modelo de señal de las señales emitidas por UAVs en movimiento, en trayectorias controladas. El modelo de señal usado también considera la atenuación del sonido con la distancia y en función de la frecuencia.

Se han comparado arrays lineales y circulares. Se ha comprobado que ambas geometrías, en principio, ofrecen resultados similares, demostrándose que la localización es posible a distancias de hasta 400 metros entre el UAV y el array de micrófonos. Esta distancia no es muy grande, pero permitirá la aplicación de estos sensores como complemento de otras tecnologías, para evitar los inconvenientes de las mismas.

Los resultados obtenidos abren nuevas líneas de investigación. Por un lado, debe considerarse el diseño de nuevas geometrías de arrays de micrófonos, como arrays coprimos. El estudio, además, debe ser validado en un ambiente real, usando las señales reales emitidas por UAVs. Finalmente, el estudio debe completarse con un estudio de la capacidad de filtrar espacialmente los sonidos interferentes y de la posibilidad de usar micrófonos directivos y de alta sensibilidad.

En cualquier caso, el análisis presentado permite aventurar la viabilidad de esta tecnología, siempre como solución complementaria para evitar problemas de otros sensores, como la oclusión por obstáculos, o la imposibilidad de detección en reposo.

10. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto *PID2021-129043OB-I00 (MSI/FEDER)*, por la Unión Europea con el proyecto *NextGenerationEU/PTR*, y por la Junta de Comunidades de Comunidad de Castilla La Mancha, a través del proyecto *SBPLY/19/180501/000350*.

12. REFERENCIAS

- [1] F. Nex, C. Armenakis, M. Cramer, D.A. Cucci, M. Gerke, E. Honkavaara, A. Kukko, C. Persello, J. Skaloud, "UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next", *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, Vol. 184, pp. 215-242, 2022.
- [2] E. Vattapparamban, I. Güvenç, A.I. Yurekli, K. Akkaya, and S. Uluagaç, "Drones for Smart Cities: Issues in Cybersecurity, Privacy, and Public Safety;" in 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, 2016, pp. 216-221.
- [3] M.A. Khan, H. Menouar, A. Eldeeb, A. Abu-Dayya, F.D. Salim, "On the detection of unauthorized drones-techniques and future perspectives: A review". *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 12, pp. 11439-11455, 2022.
- [4] D. Salvati, C. Drioli and G. L. Foresti, "A weighted MVDR beamformer based on SVM learning for sound source localization," *Pattern Recognition Letters*, vol. 84, pp. 15-21, December 2016.
- [5] C. Yang, Z. Wu, X. Chang, X. Shi, J. Wo and Z. Shi, "DOA Estimation Using Amateur Drones Harmonic Acoustic Signals," 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), Sheffield, UK, 2018, pp. 587-591.
- [6] X. Chang, C. Yang, X. Shi, P. Li, Z. Shi and J. Chen, "Feature Extracted DOA Estimation Algorithm Using Acoustic Array for Drone Surveillance," 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-5.
- [7] G. F Cardoso and R. Pater, "A Study into 21st Century Drone Acoustics," [Online], Available in: <http://www.droneacoustics.org/>
- [8] "Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere," ISO 9613-1:1993.
- [9] "Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation," ISO 9613-2:1996.

GENERACIÓN DE RIRS PARA MODELADO DE SALAS MEDIANTE VITGAN

José Ignacio Ortiz^{1*}, Ignacio Martín¹, José A. Belloch¹, Gema Piñero²

¹Universidad Carlos III de Madrid, EPS, Leganés

²Universitat Politècnica de València, iTEAM, Valencia

RESUMEN

Los modelos de aprendizaje profundo (Deep Learning, DL) se han usado desde hace unos años en aplicaciones de sonido como son la detección de eventos sonoros, cancelación de eco, mejora de la voz o clasificación de géneros musicales, entre otras. Recientemente, las redes neuronales basadas en módulos de atención (Transformers) han demostrado su gran capacidad para capturar relaciones entre las distintas partes de un texto de lenguaje natural, o de una imagen. Estos modelos DL son capaces de identificar relaciones de forma global, en lugar de depender únicamente de la información local cercana. En este trabajo se presenta una investigación exploratoria de la capacidad de este tipo de redes para modelar la respuesta acústica de una sala (Room Impulse Response, RIR) entre dos posiciones cualquiera del emisor y el receptor. Para ello se han usado las RIRs medidas en seis salas distintas con un array circular de 60 altavoces y dos arrays de micrófonos, un array planar y array circular de 64 y 30 micrófonos, respectivamente. Los resultados muestran que los parámetros de la representación tiempo-frecuencia de la RIR y el tipo de función de pérdida utilizada pueden mejorar la calidad de las RIRs inferidas por el Transformer.

ABSTRACT

Deep Learning (DL) models have been used for some years in sound applications such as sound event detection, echo cancellation, voice enhancement or music genre classification, among others. Recently, neural networks based on attention modules (Transformers) have demonstrated their great ability to capture relationships between distinct parts of a natural language text or an image. These DL models can identify relationships globally, rather than relying solely on nearby local information. In this paper we present an exploratory investigation of the ability of such networks to model the Room Impulse Response (RIR) between any two positions of the transmitter and receiver. For this purpose,

RIRs measured in six different rooms with a circular array of sixty loudspeakers and two microphone arrays, a planar array and circular array of 64 and 30 microphones, respectively, have been used. The results show that the parameters of the time-frequency representation of the RIR and the type of loss function used can improve the quality of the RIRs inferred by the Transformer.

Keywords— Deep Learning, Transformer, GAN architecture, RIR (Room Impulse Response), Spectrogram.

1. INTRODUCCIÓN

Para los seres humanos la audición es un sentido clave para reconocer lo que está pasando a nuestro alrededor y entender el entorno de forma más clara. La modelación de salas, altavoces, micrófonos, etc. son herramientas que nos ayudan a amplificar el sonido sin tener la necesidad de gritar, reproducir sonidos a mayores distancias o acondicionar una sala para mejorar el entendimiento del habla [1]. A estas mejoras ya existentes, desde hace unos años, se le incorporó la Inteligencia Artificial, creando modelos de reconocimiento de audio, de sintetización o de extracción de parámetros acústicos [2]. El gran auge y los buenos resultados de las aplicaciones creadas a partir de Transformers [3] como “Chat GPT” o modelos de difusión latente basados en Redes Adversariales Generativas (GAN) [4] como “DALL-E” han hecho que muchas investigaciones se enfoquen en esta tecnología para sacar el mayor partido a sus modelos. Este trabajo y el proyecto se propone una exploración de una combinación de técnicas de aprendizaje profundo y métodos acústicos tradicionales para crear un modelo capaz de generar RIRs en función de coordenadas espaciales. Específicamente el objetivo del trabajo pretende construir una herramienta eficiente, con una reducción significativa en la carga computacional, que mejoraría bastante el modelo de las salas, su acondicionamiento y la extracción de parámetros acústicos. El modelo consiste en una red ViTGAN, pero con

* *Autor de contacto:* 100383476@alumnos.uc3m.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

This work has been supported by the Spanish Ministry of Science and Innovation under projects PID2021-124280OB-C21, PID2022-137048OA-C43, TED2021-131401A-C22, funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and “ERDF A way of making Europe”, as well as the Regional Government of Madrid throughout project MIMACUHSPACE-CM-UC3M.

la novedad de introducir un Vision Transformer como discriminador.

Trabajos relacionados En la actualidad existen simuladores acústicos geométricos capaces de realizar aproximaciones de RIRs. [5, 6] Dentro de su espectro de análisis acerca de la propagación del sonido, las RIRs son un elemento fundamental a la hora de diseñar salas, analizar acústicamente la arquitectura de una sala, representar la propagación del sonido, etc. Para generar las respuestas al impulso de las salas, se utilizan distintos métodos y algoritmos de trazado de rayos que, a su vez, se basan en teorías físicas sobre la propagación del sonido y cómo interactúan con el entorno [7]. El desarrollo exponencial de la Inteligencia Artificial ha dado lugar a experimentar e investigar sobre usos en la acústica, con respecto a nuestro tema, se han implementado modelos que mejoran estos simuladores acústicos geométricos. Por ejemplo, con investigaciones sobre la generación de RIRs mediante redes neuronales profundas [8], específicamente con modelos Autocodificador Residual, un estudio que [9] pretende crear un modelo llamado “IR-GAN” capaz de sintetizar RIRs artificiales a partir de RIRs reales, con el objetivo de mejorar el reconocimiento automático del habla en campo lejano en entornos diferentes a los que se evalúan en el conjunto de entrenamiento mediante la arquitectura GAN.

2. ViTGAN

Para llegar a cumplir el objetivo, primero se dio un acercamiento hacia los Vision Transformers. Se realizaron pruebas de clasificación con parámetros que después se usarían en la red ViTGAN. Una vez se tuviese un modelo de clasificación ViT, se implementaría en la red GAN como discriminador, acoplado su uso como clasificador de imágenes reales o falsas.

2.1. Preprocesamiento

Para representar visualmente cómo varía la energía sonora a lo largo del tiempo y en diferentes frecuencias, se utiliza el espectrograma de la señal. El espectrograma es una representación compuesta que muestra cómo la energía sonora se distribuye en el tiempo y en diferentes bandas de frecuencia. Para conseguir visualizar el espectrograma hay que transformar la señal de sonido en función del tiempo (dominio temporal), en función de la frecuencia (dominio frecuencial), esto se consigue mediante la “Transformada de Fourier.” En este caso se utiliza la “Transformada corta de Fourier (STFT),” [10] la cual divide la señal en fragmentos y calcula la DFT para cada componente, así se captura la variación de las frecuencias en cada instante del tiempo. Esta técnica utiliza ventanas deslizantes logrando una representación tiempo-frecuencia de la señal. Dado que los archivos de audios se componen de cadenas de texto, se realiza una conversión de codificación (de 24 a 16 bits), la

lectura del archivo, decodificación del audio y finalmente la transformación a espectrograma. Durante los experimentos con el Vision Transformer, se observó que al dividir la imagen original en patches, los resultados no concordaban con la imagen original, se producían imágenes diferentes. Al unir los recortes para producir la imagen entera, se formaba una diferente. Por lo tanto, para una mejor lectura de los datos el espectrograma se superpuso tres veces, dado como resultado una imagen de (129,126,3). Una imagen RGB también tiene 3 canales, una para cada canal de color, sin embargo, el espectrograma al ser exactamente igual se representa en escala de grises. Con esta modificación, los patches unidos generan la imagen original idéntica.

2.2. Clasificación de audio con ViT

Para la realización de pruebas y familiarización con el modelo, se escogió como dataset una versión reducida del famoso conjunto de datos “speech commands”, llamado “mini speech commands”. Los datos son 8000 audios de personas diciendo palabras monosílabas, como por ejemplo “left”, “right”, “up”, “down”, cada audio dura un segundo y su frecuencia de muestreo es de 16kHz. El experimento de clasificación consistía en detectar las 8 palabras distintas que había en el dataset, para ello se dividió el conjunto de datos en train (con 6000 audios, un 75% del total) y test (con 2000 audios, un 25% del total). A su vez, para una mejor visualización de las métricas de evaluación, el 20% del conjunto de entrenamiento se dividía en un conjunto de validación que se comportaría como un conjunto de prueba dentro del entrenamiento. Una vez el conjunto está dividido, el siguiente paso es preprocesar los archivos de la misma manera que se especifica en el apartado 2.1, pero añadiendo la obtención de la etiqueta de cada audio. En este punto ya se tiene los conjuntos de entrenamiento y prueba con espectrogramas y sus respectivas etiquetas, es decir, se tiene los datos necesarios para introducirlos al modelo. A continuación, se describen las capas y los parámetros de los que se compone el ViT.

Patches: esta clase divide los espectrogramas en patches, donde se puede modificar el tamaño de patch, el stride (tamaño de paso), rates (tasa de dilatación) y el padding (margen de relleno). En este caso los valores elegidos fueron: un tamaño de 6x6 píxeles por patch, un stride igual al tamaño del patch, es decir que no se pisan las ventanas y sin padding, es decir, que los patches extraídos son completamente contenidos dentro de los límites de la imagen, sin relleno.

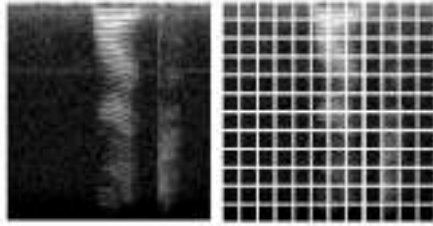


Figura 1. Representación de patches.

PatchEncoder: después de dividir la imagen original en patches, es decir, recortes de la imagen principal, se convierten en vectores de características (embeddings), cada patch se convierte en un vector en el que se le añade una posición codificada.

Bloque Transformer: una vez se tienen los embeddings, se introducen en el Transformer, compuesto por varios bloques. En el interior de cada bloque se encuentran las mismas capas: una capa de normalización, una serie de cabezales (Multi-Head Attention) donde se capta la correlación de las imágenes, otra capa de normalización y entre medias capas de conexión (MLP). En el caso de la arquitectura, se otó por 8 bloques Transformer y 4 cabezales de atención, idóneos para que el modelo aprenda a relacionar cada grupo de espectrogramas. Si se hubiese escogido parámetros de valores más altos, la red podría verse envuelto en un problema de sobre ajuste, por el contrario, si cogiese valores más bajos, el modelo no funcionaría de forma correcta ya que no establecería las relaciones necesarias.

Dada esta configuración, el siguiente paso es entrenar el modelo, para ello se utilizó un optimizador AdamW con learning rate $1e-3$, weight decay $1e-3$, durante 40 epochs y batch size 64. Como función de pérdida se utilizó Sparse Categorical Crossentropy (1) ya que es eficaz para problemas de clasificación multiclase, calcula la pérdida entre las distribuciones de probabilidad predichas y las reales.

$$S(w) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(\hat{y}_i) + \log(1 - \hat{y}_i)] \quad (1)$$

2.3. Generación de audio con ViTGAN

Los Vision Transformer han demostrado ser bastante buenos en el reconocimiento de imágenes, por esta razón, se ha querido introducir su rendimiento en la generación de imágenes. Se han realizado varias investigaciones con respecto esta arquitectura, introduciendo el Transformer como generador y discriminador en [11] y solamente como discriminador en [12].

Dado que la investigación sobre la introducción del Transformer en el discriminador y generador, dio resultados parecidos a la red GAN original y para hacerlo posible se tuvo que extender la complejidad y resolver ciertos problemas, en este trabajo se opta por la introducción del ViT dentro del discriminador [12] porque, aparte de ser menos complejo que

el modelo explicado en [11], las redes basadas en Self-Attention utilizan menos parámetros que las redes convolucionales, es decir, el rendimiento al que puede optar es más o menos el mismo pero con un modelo más optimizado.

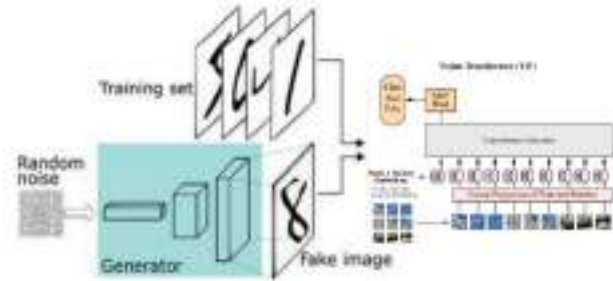


Figura 2. Arquitectura ViTGAN. [9]

En primer lugar, los datos se cargan y son preprocesados de la misma manera que en el ViT, explicado en el apartado 2.1 “Preprocesamiento”. El único cambio que se realiza es que se recorta la imagen a 126×126 ya que el modelo genera imágenes cuadradas, solamente se recorta un poco de frecuencias bajas. En segundo lugar, se configura el generador, compuesto por una red convolucional formado por capas Transpose (Conv2DTranspose), exactamente 3 capas configuradas con un tamaño de kernel 3, sin padding y con tamaños de filtro 8, 16 y 32 respectivamente. El ruido latente tiene una forma de 100 que se introduce a una primera capa densa (Dense) donde se añaden más neuronas al inicio formando una imagen de $(7, 7, 128)$. Esta imagen es ruido que a medida que pase por las capas Transpose, se irá agrandando y generando una imagen. La imagen objetivo debe tener una forma de $(126, 126, 1)$ ya que debe ser de la misma forma que el espectrograma original. En tercer lugar, se implementa el discriminador de la misma manera que en el apartado anterior 2.2, pero con distinto preprocesado ya que, aunque en el ViT anterior, se tuvo un problema con los patches cuando solo se recogían espectrogramas de un solo canal, en este caso, se observa un problema más grave en la generación ya que no lo realiza con total exactitud (en el siguiente apartado “Experimentos y resultados” se proporcionan imágenes de prueba). Por esta razón, aunque el discriminador no obtenga los resultados similares a los recortes de la imagen original, sigue encontrando patrones entre las diferentes imágenes, por lo que funciona correctamente con un solo canal.

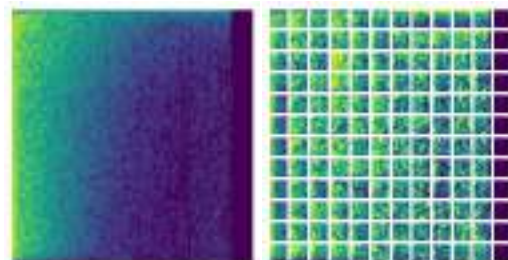


Figura 3. Representación en patches de una RIR.

Aparte del preprocesamiento, se utilizan diferentes parámetros. Se utilizan 6 cabezales, 10 bloques Transformer y un tamaño de patch de 10x10 píxeles, ya que la imagen antes de introducirlo al Transformer no recibe una alteración del tamaño y funciona mejor con un patch más grande. Al contrario que el generador, el discriminador se entrena antes de entrar a la red GAN, ya que después no se va a entrenar, esto se debe a que, si el discriminador entrenase a la vez que el generador, no podría ser engañado por el generador, aprendería a diferenciar el real del falso continuamente, a medida que el generador mostrase mejores resultados. El discriminador se entrena mediante un optimizador Adam, es decir, casi el mismo optimizador que el explicado en el apartado 2.2, pero sin el parámetro weight decay. Además, utiliza “binary crossentropy” (2) como función de pérdidas ya que el objetivo de este modelo en la red GAN es realizar una clasificación binaria y esta función es la óptima para este trabajo. En cuarto lugar, se crea la red GAN compuesta por las dos partes ya configuradas, el discriminador y el generador. La manera de entrenar la red es exactamente igual a la del discriminador ya que tiene que devolver la probabilidad de ser real porque con este dato se entrenará el generador. Por último, después de tener todo implementado y listo, se entrena la red. El entrenamiento consiste en pasar datos reales y falsos al discriminador etiquetados como reales para que devuelva valores de pérdida y el generador pueda entrenarse. También se incorpora una función durante el entrenamiento que imprime imágenes generadas cada 10 épocas, de esta manera se puede ver un seguimiento de como mejora la generación de imágenes.

$$B(w) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(p_i)) \quad (2)$$

3. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

3.1. Pruebas ViT

Las primeras pruebas como toma de contacto con la arquitectura no fueron buenas, al principio, se encontró un pequeño sobreajuste con respecto el conjunto de validación, pero se logró solucionar, sin embargo, los resultados no eran los esperados. La red era demasiado sencilla y no se conseguía encontrar demasiados patrones. Aparte de los parámetros mostrados en la Tabla 1, cabe destacar que las capas densas del final del modelo antes de pasar por la red MLP, eran de pocos parámetros, lo que dificultaba el aprendizaje complejo del modelo. El resultado de esta primera aproximación fue aceptable, tal y como se muestra en la Figura 4, se obtuvo una precisión del 73.5% en la clasificación del conjunto de entrenamiento y un 79.5% en el conjunto de prueba.

Los parámetros utilizados en el modelo final están detallados en el apartado 2.2, igualmente para la fácil comparación, se nombran en la Tabla 1 también. Además de los parámetros ya

mencionados, es importante comentar que se añadieron 2 capas Dropout con parámetro 0.5 debido a el pequeño sobreajuste que había. Los resultados obtenidos con el conjunto test son bastante fiables ya que cuenta con 2000 muestras con las que no ha entrenado el modelo, por lo tanto, el porcentaje de precisión que se obtiene es completamente real. Se logró una precisión del 97% en el conjunto de entrenamiento y un 98.5% en el conjunto de prueba.

Tabla 1. Parámetros de las pruebas ViT.

	Lr	Wd	Epoch	Batch size	Bloque Transf.	Head
1°	1e-3	1e-3	40	16	6	2
2°	1e-3	1e-3	40	64	8	4

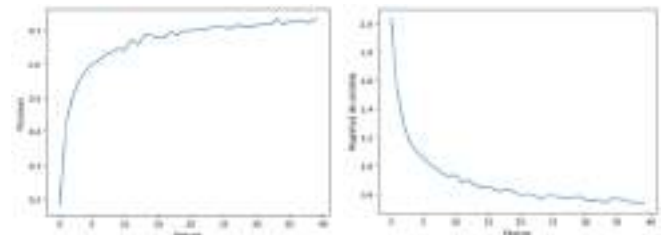


Figura 4. Resultados de la primera prueba.

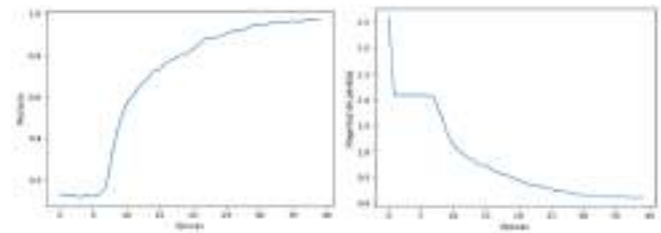


Figura 5. Resultados de la segunda prueba.

3.1. Pruebas ViTGAN

Todas las pruebas se realizaron con un batch size de 64, 60 épocas, con un optimizador AdamW y binary crossentropy como función de pérdida, es decir, con los parámetros que se explican en el apartado 2.3. Dado que los errores que se iban detectando no eran afectados directamente por esta configuración, se calificó como satisfactoria desde el principio. Además, se realizaron pruebas con otras configuraciones, pero sin mayor éxito. Al ser una generación de imágenes, la comparación humana entre la imagen real y generada fue una métrica bastante fiable. Pero aparte, por cada iteración de entrenamiento de la red GAN, se obtenían métricas de precisión y pérdida, con los que se intuía numéricamente la calidad de las nuevas imágenes. En las primeras pruebas que se realizaron, se encontró un problema

grave en la generación de RIRs. Este es un problema típico en las redes GAN ya que el generador cuando es demasiado complejo tiende a sobre ajustarse y aprende a crear las mismas imágenes con los mismos patrones. Se encasilla en un mismo patrón y lo repite en todas sus generaciones.

Tabla 2. Parámetros de la primera prueba VITGAN

	Capas Transpose	Stride	Ruido latente	Resolución
1°	64 128 256 256	2 2 2 3	(5,5,128)	(120,120,1)

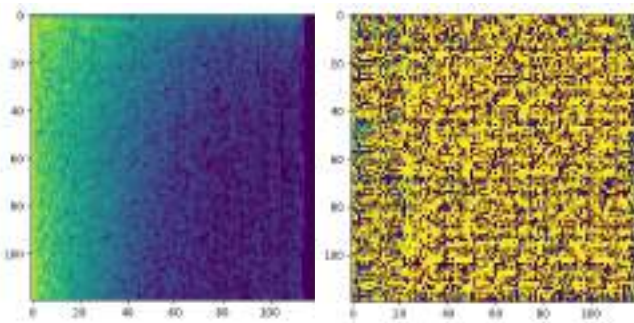


Figura 6. Comparación de RIRs (1)

En el siguiente experimento se disminuyó la profundidad de las capas Transpose dentro del generador, de esta manera, se conseguía una red más sencilla y se solucionaba la repetición de imágenes. Además, se probó a agrandar la imagen y obtener un poco más de información. Sin embargo, se consiguió una imagen un poco borrosa, sin nitidez en los detalles, es decir, con pérdida de información.

Tabla 3. Parámetros de la primera prueba VITGAN

	Capas Transpose	Stride	Ruido latente	Resolución
2°	8 16 32	2 3 3	(7,7,128)	(126,126,1)

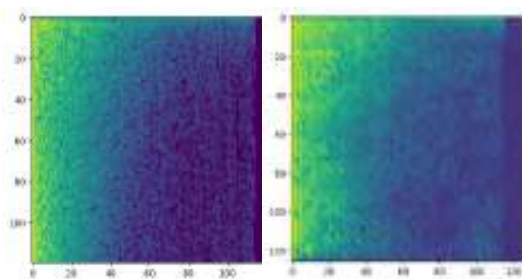


Figura 7. Comparación de RIRs (2)

Dada la mejora en la calidad de las generaciones se probó, con los mismos parámetros, a realizarlo con espectrogramas con tres canales, debido al problema que se generaba al dividir en patches dentro del ViT. Pero los resultados no fueron buenos, se perdía información, los valores más cercanos a 0 se disipaban y contaban con valores más altos de lo esperado, se representaban de un color grisáceo en lugar de negro. Además, la imagen generada seguía apareciendo borrosa.

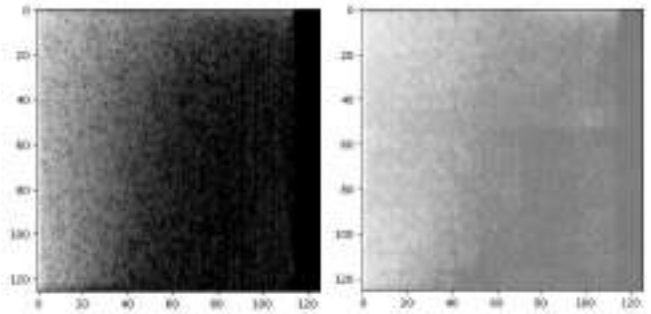


Figura 8. Representación de RIRs con 3 canales

Tras varias pruebas con respecto al número de capas, la profundidad de las capas, el número de canales y la resolución de la imagen, se obtuvo los parámetros idóneos para que la generación de RIRs sea correcta. Un cambio importante fue el aumento del tamaño de la resolución del ruido latente, manteniendo el número de capas y la sencillez de la profundidad.

Tabla 4. Parámetros de la primera prueba VITGAN

	Capas Transpose	Stride	Ruido latente	Resolución
4°	8 16 32	2 2 3	(10,10,128)	(120,120,1)

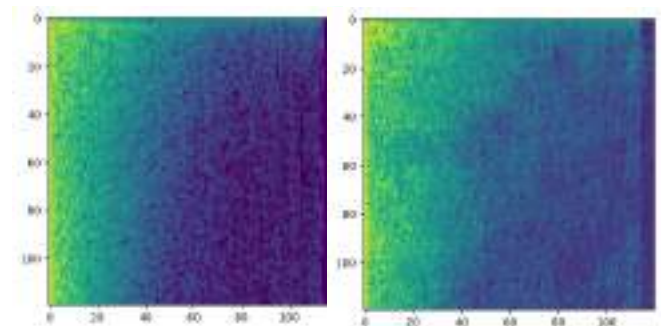


Figura 9. Comparación de RIRs (3)

4. CONCLUSIONES

Los objetivos que se plantearon al principio del trabajo fueron sobre todo desarrollar y unir ambos modelos de manera satisfactoria. Se encontraron varios problemas en el desarrollo, como en la formación de los patches en el ViT o el sobreajuste inestable en el ViTGAN, pero se lograron solucionar.

Con respecto a las pruebas del Vision Transformer, se ha creado un clasificador casi perfecto, clasifica 8 clases de audios con una precisión de 98.5% y una pérdida casi nula. Este mismo modelo se probó con otros datasets que no duraban 1 segundo o que fuesen de peor calidad y los resultados siguieron siendo satisfactorios, no con tanta precisión, pero rondando el 90%. Se mejoró la robustez del modelo creando una función alternativa donde se aumentaban los datos cambiando el pitch del audio y añadiendo ruido. Esta función se creó porque probando diferentes datasets, en algunos se producía un pequeño sobreajuste y modificando un poco los audios, el modelo aprende a generalizar más y no repite patrones fácilmente.

Todos estos resultados ayudan a la implementación y buen funcionamiento dentro del experimento de ViTGAN, realizando estos experimentos antes, se tiene la certeza de que el discriminador debe clasificar bien ya que los parámetros escogidos son los óptimos.

En relación con la red ViTGAN, se ha creado un modelo capaz de generar imágenes parecidas a las que se le introduce por la entrada con buena calidad. El modelo tiene distintos parámetros de configuración que darán como resultado imágenes de diferente tipo, en este caso, nuestro objetivo era trabajar con RIRs, con una duración muy pequeña y con 16 bits. Sin embargo, se puede trabajar con mayor duración, cambiando la resolución de la imagen y modificando ciertos valores. La arquitectura es lo que realmente nos interesa.

El modelo trabaja con entradas de audios y salidas de imagen, dentro se produce todo el procesamiento. En este primer paso del proyecto, solamente se tuvo en cuenta la magnitud del audio, los espectrogramas no muestran la fase del audio, este factor se podrá implementar en el futuro. Desde el principio, se le dio un enfoque visual al trabajo, como ya explicado anteriormente, lo más importante en la investigación es el comportamiento de la arquitectura con respecto las RIRs. Una vez, se obtiene un generador de RIRs, se puede obtener información a partir de la imagen.

5. REFERENCIAS

[1] Naylor, P. A., & Gaubitch, N. D. (2010). *Speech dereverberation (Vol. 2)*. London: Springer.

[2] Eaton, J., Gaubitch, N. D., Moore, A. H., & Naylor, P. A. (2016). Estimation of room acoustic parameters: The ACE

challenge. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 24(10), 1681-1693.

[3] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30.

[4] Creswell, A., White, T., Dumoulin, V., Arulkumaran, K., Sengupta, B., & Bharath, A. A. (2018). Generative adversarial networks: An overview. *IEEE signal processing magazine*, 35(1), 53-65.

[5] Vairetti, G., De Sena, E., Catrysse, M., Jensen, S. H., Moonen, M., & van Waterschoot, T. (2017). A scalable algorithm for physically motivated and sparse approximation of room impulse responses with orthonormal basis functions. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 25(7), 1547-1561.

[6] Zhao, J., Zheng, X., Ritz, C., & Jang, D. (2022). Interpolating the directional room impulse response for dynamic spatial audio reproduction. *Applied Sciences*, 12(4), 2061.

[7] Benutti Giunta, M. Análisis de Parámetros acústicos para validación de modelos de simulación acústica de salas. (2019) [Trabajo de Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid].

[8] Martín Salinas, I. Synthesis of Room Impulse Responses by Means of Deep Learning. (2022) [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid].

[9] Ratnarajah, A., Tang, Z., Manocha, D. (2020). IR-GAN: "Room Impulse Response Generator for Far-field Speech Recognition". *Audio and Speech Processing (eess.AS)*. Ratnarajah. ArXiv, abs/2010.13219.

[10] Portnoff, M. (1980). Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28(1), 55-69.

[11] Lee, K., Chang, H., Jiang, L., Zhang, H., Tu, Z., & Liu, C. (2021). Vitgan: Training gans with vision transformers. arXiv preprint arXiv:2107.04589.

[12] Hirose, S., Wada, N., Katto, J., & Sun, H. (2021). Vitgan: Using vision transformer as discriminator with adaptive data augmentation. In *2021 3rd International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)* (pp. 185-189). IEEE.



PROJETO MIRA – DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA INTELIGENTE DE MONITORIZAÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL

*Luís Conde Santos**, *Cristina Leão*, *João Figueiredo*¹
Afonso Melo, *Guilherme Covas*, *André Carvalho*²

¹ dBwave.i - Acoustic Engineering, SA, Oeiras, Portugal (www.dbwave.pt)

² Instituto de Soldadura e Qualidade, Oeiras, Portugal (www.isq.pt)

RESUMO

A poluição sonora, identificada pela Organização Mundial de Saúde como um dos principais fatores de Risco Ambiental para a Saúde [1], é objeto de atenção crescente por parte da sociedade, gerando frequentemente reclamações e conflitos entre a população e as entidades responsáveis pela emissão de ruído, cada vez mais com recurso à internet e às redes sociais, muitas vezes com aspetos subjetivos associados à perceção de incomodidade acústica.

Neste contexto, a monitorização contínua de ruído ambiental assume uma importância crescente, de modo a reduzir a incerteza e subjetividade inerentes ao processo de avaliação de ruído ambiental e de incomodidade acústica.

Nesta comunicação será apresentado o projeto MIRA (Monitorização Inteligente de Ruído Ambiental), que consistiu no desenvolvimento e teste de uma solução tecnológica para a monitorização contínua de ruído de atividades ruidosas, constituída por estações de monitorização de ruído, plataforma digital integrada e algoritmos de inteligência artificial. A solução permite, por um lado, um registo contínuo de parâmetros objetivos do ruído provenientes de até 100 estações de monitorização e, por outro, a identificação de padrões de variação do ruído, de eventos sonoros ou de ruídos anómalos ou particularmente incomodativos (tonais, impulsivos), com capacidade de deteção e classificação em tempo quase-real.

ABSTRACT

Noise is one of the main environmental risk factors for health. Exposure to environmental noise can lead to stress reactions, sleep disturbance, mental health and well-being, cognitive impairment in children, as well as negative effects on the cardiovascular and metabolic system. The World Health Organisation has identified noise as the second most significant environmental cause of disease in Western Europe, after air pollution.

It is in this context that MIRA project arises, as described in this paper, which lays on the development of an intelligent and seamless continuous monitoring system for environmental noise, with multiple configurations, consisting

* *Autor de contacto:* luis.conde@dbwave.pt

Copyright: ©2023 Luís Conde Santos et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

of sound level meters and sensors (hardware) that communicate with a management, processing and data analysis platform (software), capable of detecting and classifying different types of sounds events, through the incorporation of *machine-learning* (ML), as well as notification of alerts and information for decision-making.

This system provides a service to different entities from the most diverse sectors, enabling them with the knowledge to comply with noise legislation and regulations. This solution gathers an innovative and highly differentiating characteristics from the actual products in the market.

Key Words — *audio classification, machine-learning, noise, sound-level-meter, monitoring, automation.*

1. INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais para avaliar o ruído ambiental, quer sejam a realização de medições de ruído mediante amostragens pontuais de curta duração com um sonómetro, operado no local por um técnico (pouco representativas), ou mesmo a elaboração de mapas de ruído (estáticos), revelam-se, já hoje, insuficientes para dar resposta às aspirações da população e às necessidades das entidades com responsabilidades nesta matéria. O problema decorre da enorme dinâmica do ruído num ambiente exterior, conjugada com o impacto imediato que um ruído excessivo ou incómodo pode ter nas pessoas a ele expostas.

No que respeita às medições de ruído “tradicionais”, um dos problemas práticos que surge é o facto de, devido à necessidade de presença física do técnico para realizar a medição e de se terem de recolher amostras em dois dias distintos e em três períodos de referência (diurno, entardecer e noturno), os laboratórios acreditados para este tipo de ensaios tenderem, dentro dos requisitos normativos, a realizar o menor número de amostragens, com a mínima duração possível e evitando as horas noturnas mais tardias.

No que respeita aos mapas de ruído, muito úteis para efeitos de planeamento e ordenamento do território e para orientar a elaboração de planos de ação de redução de ruído, estes baseiam-se em cálculos de valores médios de longa duração (1 ano) dos indicadores de ruído, sendo por isso

eminentemente estáticos e alheios à dinâmica temporal inerente ao ruído ambiental. São também por isso insuficientes para traduzir o impacto imediato que um ruído excessivo ou incómodo pode ter na população exposta.

De facto, num contexto de rápidas mudanças na sociedade e nas tecnologias ao seu dispor, os métodos e tecnologias utilizados na avaliação e gestão do ruído ambiental têm evoluído lentamente, não conseguindo, acompanhar as verdadeiras mudanças de paradigma que vêm ocorrendo à sua volta.

A dBwave, empresa de engenharia acústica do Grupo ISQ, procurando atender a este tipo de questões, desenvolveu e tem vindo a aplicar metodologias de monitorização de ruído em contínuo, por períodos mais ou menos alargados (desde 48h a várias semanas), com análise manual dos registos em pós-processamento, metodologias essa que começam atualmente a revelar-se insuficientes para as necessidades de uma franja crescente dos seus clientes mais exigentes. Além disso, este tipo de análises, feitas manualmente, consomem muito tempo e não permitem qualquer acesso remoto aos dados durante a monitorização, nem qualquer controlo em tempo real de ruídos anómalos e que só são identificados *à posteriori*.

A adicionar, a quantidade de marcas e modelos de sonómetros existentes no mercado obriga a utilização de vários *softwares* de monitorização e tratamento de dados, cada um específico de cada marca e modelo, e a análise e classificação sonora após monitorização torna-se laboriosa, com a elaboração de relatórios demorada e outros obstáculos relevantes no âmbito atual de medições de ruído.

2. MODELOS DE MACHINE LEARNING PARA CLASSIFICAÇÃO AUDIO

O desenvolvimento de modelos de IA para classificação de eventos sonoros, e sua consequente integração nos sistemas atuais, ainda se encontram numa fase bastante embrionária, com poucos *use cases* relevantes para a tecnologia em questão.

Devido à complexidade de análise a ficheiros áudio, por vezes mais difícil do que a análise de imagens ou vídeo, graças à sua estrutura complexa, não estruturada, muitas vezes com ruído branco, ruído de fundo, e necessidade de um elevado pré-processamento, traz grandes dificuldades à extração de informação útil do conjunto de dados original e à criação de modelos matemáticos capazes de modular o problema a estudar [5]. Igualmente, a falta de um grande volume de dados para treinar modelos capazes de identificar inúmeras fontes de ruído, torna esta questão ainda mais complexa. No entanto surgiram novos algoritmos para o efeitos de classificação, é um exemplo o modelo [3] capaz de identificar somente quatro classes diferentes: (1) porta de madeira a abrir e (2) fechar, (3) metal a cair e (4) o som de água a correr).

Recentemente, começaram a surgir *datasets* em grande escala, bem como modelos de ML mais complexos capazes de processar grandes volumes de informação. Estes avanços proporcionaram a investigação e desenvolvimento de algoritmos mais eficientes no reconhecimento de padrões sonoros. Uma das abordagens é a classificação de ficheiros áudio, convertidos em espectrogramas e usados como *input* para *Convolutional Neural Network (CNN)* [4]. No entanto, as *CNNs* foram inicialmente desenvolvidas para análise de imagens, que contêm informação estática no tempo, sendo que o espectrograma tem uma dimensão adicional, o intervalo temporal, tornando os dados sequenciais.

Mais recentemente, foi desenvolvido outro algoritmo [6] com o propósito de preencher a lacuna dos muitos dos trabalhos desenvolvidos anteriormente, *i.e.*, estes concentravam-se em tarefas particulares com um número limitado de classes, não ambicionando reconhecer uma vasta gama de fontes sonoras. Em 2017 a *Google* disponibilizou publicamente um *dataset* - *AudioSet* [2], que incorpora um grande volume de dados, composto por 1.9 milhões de ficheiros áudio, com 527 classes diferentes.

Tirando partido deste *dataset*, foi desenvolvido um modelo designado por *Pretrained Audio Neural Networks (PANNs)* [6]. Este modelo *PANNs* inclui uma camada de processamento com a transformada de *Fourier*, permitindo assim ao algoritmo aprender informação no domínio tempo-frequência. A informação no domínio tempo-frequência alimenta uma rede neuronal que permite a identificação de 527 padrões áudio (presentes no *dataset AudioSet*). Existem também outros modelos desenvolvidos utilizando este *dataset* [7] [9] [10]. Para a nossa aplicação e os requisitos definidos no projeto considerou-se a utilização do modelo *PANNs*, devido ao seu código público e vasta documentação.

3. O PROJECTO MIRA

Para responder aos desafios anteriormente descritos, a solução inovadora do projeto MIRA, idealizado pela dBwave.i, foca-se na monitorização de ruído em contínuo, desacompanhada, pretendendo capacitar todo o processo com automatismos desenvolvidos para identificação de sons ou ruídos específicos, bem como a geração de alertas e relatórios diários de medições realizadas. Sendo assim, o MIRA agrega diferentes módulos, todos interligados por uma arquitetura robusta e utilizados através de uma Plataforma Digital Integrada, que:

- É agnóstica em relação aos diferentes equipamentos (sonómetros), com integração rápida de novas marcas e/ou modelos;
- Armazena e trata os dados de centenas de equipamentos em tempo real;
- Monitoriza em contínuo e controla múltiplas métricas sonoras, assim como permite a sua visualização em tempo real;
- Gera alertas e relatórios de forma automática;

- Classifica rapidamente ruídos distintos através de métodos de IA;
- Pode alocar os equipamentos a múltiplos projetos, independentes entre si e com acessos personalizados, para cada um dos quais é exibida num mapa a localização instantânea de cada equipamento (GPS).

O sistema desenvolvido proporciona também:

- Substituir uma boa parte do trabalho laborioso do técnico;
- Reduzir o tempo e esforço na análise, aumentando a produtividade dos estudos de ruído ambiental;
- Caracterizar as diferentes origens sonoras e identificar em tempo útil se o ruído advém de fontes do ruído particular em análise (indústria, via rodoviária, construção, etc) e/ou com características mais incomodativas e prejudiciais para a saúde, que deverão merecer foco de atenção, ou se são sons naturais ou outros integrantes do ruído residual (animais, vento, chuva, etc);
- Gerar alertas por email ao responsável da instalação ruidosa em estudo de modo a permitir atuar de imediato na resolução do problema;
- Elaborar relatórios periódicos (diários, semanais, mensais) de forma automática;
- Acompanhar a evolução do enquadramento normativo e regulamentar em matéria de ruído ambiental que, em traços gerais, aponta novos objetivos e metodologias que acentuam ainda mais a necessidade de novas técnicas de monitorização.

Assim, a solução apresentada permite, de modo muito significativo, melhorar tecnologicamente o método de avaliação e análise de ruídos, reduzindo os custos dessa análise e aumentando a sua abrangência, para além de permitir oferecer novos serviços e soluções, desde o controlo de atividades ruidosas em tempo real e registo continuado de evidências de *compliance* com os limites regulamentares. Contribui, assim, para a melhoria da qualidade de vida e da saúde da população, designadamente nas áreas urbanas e na vizinhança de áreas industriais ou de infraestruturas ruidosas, potencia o desenvolvimento de novos serviços e ajuda empresas e outras organizações a melhor gerir e minimizar os impactos acústicos da sua atividade, reduzindo o seu nível de risco, aumentando a previsibilidade e melhorando a sustentabilidade do seu negócio/atividade.

4. PLATAFORMA DIGITAL INTEGRADA

A plataforma digital integrada permite integrar e centralizar diversas tecnologias já existentes, bem como novas desenvolvidas com características inovadoras e diferenciadoras da concorrência. Procura assim responder às necessidades identificadas no mercado, em setores como a indústria, construção, infraestruturas de transporte, municípios e espetáculos musicais e desportivos.

A plataforma MIRA é desenhada de forma a permitir flexibilidade, performance, escalabilidade e fácil utilização. O sistema está dividido em diferentes módulos com o principal foco na capacidade de escalar consoante o tráfego que estiver a ocorrer no momento. Para o efeito, é utilizado um serviço de *cloud* que permite flexibilidade das capacidades computacionais contratadas de acordo com a necessidade do momento. Este aspeto é crítico pois permite garantir uma grande segurança na qualidade e responsividade do serviço, mas também controlo dos custos associados, já que estes estão diretamente relacionados com o número de equipamentos/trabalhos a ser realizados em cada momento.

A Figura 1 ilustra os vários módulos existentes e como eles comunicam entre si.

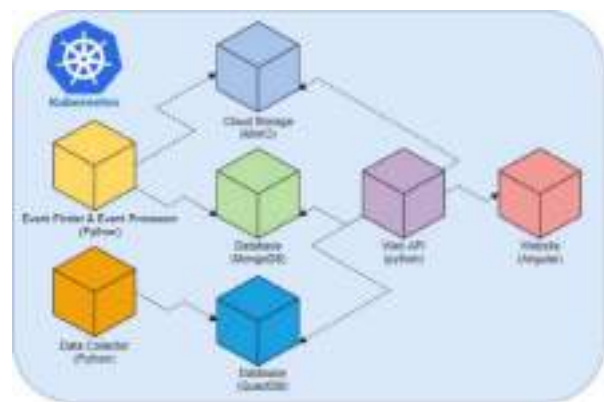


Figura 1: Esquema da arquitetura do MIRA.

Destacam-se então os seguintes módulos:

- *Website*: proporciona um acesso seguro, interativo e acessível às funcionalidades da plataforma;
- *REST API*: responsável por servir informação aos vários componentes da plataforma, orquestrando respostas e processos resultantes de pedidos do utilizador;
- *Data Collector*: consiste num módulo isolado que se conecta aos equipamentos (sonómetros/estações de monitorização de ruído) recolhendo as diferentes métricas sonoras e armazenando-as numa base de dados de séries temporais;
- *Event Finder & Event Processor*: consiste num módulo isolado, sem interação com o exterior, que verifica, de forma cíclica em intervalos de tempo regulares pré-definidos, se existem ficheiros áudio no sonómetro, criados pela ativação de um *trigger* pré-definido (evento); Este módulo é também responsável pela identificação dos ruídos em cada ficheiro áudio (evento), através de um modelo de ML, sendo o seu *output* disponibilizado na plataforma;
- Bases de dados: A escrita e/ou leitura de dados é um processo contínuo e decorre em paralelo com todos os outros componentes da plataforma. Recorre-se então a três géneros de bases de dados, sendo a mais crítica apropriada para entradas indexadas no tempo.

- Outros módulos: A plataforma está ainda munida de outras funcionalidades que trabalham em paralelo permitindo dar uma melhor resposta às necessidades do utilizador e que se despoletam por pedidos à *REST API*;
 - Alertas: um alerta é gerado após a ativação de um *trigger* pré-definido na plataforma, onde o utilizador receberá a informação através de sms e/ou correio eletrónico;
 - Relatórios: Os utilizadores podem gerar relatórios referentes a a um dado período de análise;
 - Exportar dados: Os utilizadores podem descarregar os dados recolhidos pela plataforma referentes a um período de análise.

4.1 Aquisição de dados em tempo real

Sendo um dos objetivos do projeto a recolha, processamento e visualização de dados em tempo real, a cada segundo (capaz de detetar sons impulsivos de curta duração), o módulo *data collector* anteriormente referido, torna-se parte essencial da arquitetura do sistema.

Este módulo depende intrinsecamente da base de dados, que necessita de ser indexada ao tempo, permitindo a inserção de um grande volume de dados por segundo, bem como rápida velocidade de leitura.

É possível recolher múltiplas métricas e espectros a cada segundo, com possibilidade de configuração pelo utilizador, dentro dos parâmetros e indicadores disponíveis em cada equipamento, por exemplo:

- Métricas globais: *LAF*, *LAI*, *LAFeq*, *LAIeq*, *LAFMax*, *LAFMin*, *LAIMax*, *LAIMin*, *LCpeak*, *LAIT3*;
- Espectros: *LAF*, *LCF*, *LZF*, *LAFeq*, *LCFeq*, *LCZeq*

Dada a quantidade de métricas globais e espectros recolhidos e a frequência de amostragem necessária, uma vez por segundo, é então realmente crítico a escolha da base de dados.

Considere-se um exemplo onde existe: uma taxa de amostragem de 1 segundo, 100 equipamentos, 10 métricas (por equipamento) e 8 espectros com 34 bandas de frequência (por equipamento). Isto totaliza ~1.69 milhões de valores escritos por minuto e 101 milhões por hora.

Existindo diversas soluções presentes no mercado, otimizadas para armazenamento e leitura de dados baseados no tempo a escolha recaiu sobre uma base de dados pública e bem documentada, com alto desempenho de escrita, capacidade analítica fácil recorrendo à linguagem SQL, bem como simplicidade de integração com outros módulos do sistema.

Dado que a inserção das múltiplas leituras na base de dados não deve ser apenas baseada na sua própria capacidade de escrita, foi utilizado adicionalmente um sistema de filas de espera extremamente rápido e escalável, que desacopla os fluxos de informação, resultando numa baixa latência, ou seja, num pequeno tempo de processamento de dados simultâneos através de uma conexão de internet, garantindo-

se assim a capacidade de receber dados segundo a segundo de cada equipamento.

As soluções acima descritas, aliadas a tecnologia pública que permite gestão automática, alta disponibilidade e escalabilidade de micro serviços conforme necessário, garante a recolha e armazenamento dos diferentes valores das métricas e espectros a cada segundo, com uma elevada confiança, ajustando e escalando o sistema ao número de equipamentos, trabalhos e tráfego em curso.

O objetivo é então garantir que as amostras são sempre recolhidas com a cadência de 1Hz e, caso a latência aumente para valores maiores ou iguais a um segundo, o número de recursos computacionais escala automaticamente, sendo que estes diminuem caso o contrário se verifique.

4.2. Event processor - identificação de audios

Um dos aspetos mais críticos e inovadores para o sucesso da plataforma MIRA, é a identificação e classificação de forma automática da fonte sonora, de forma a permitir uma análise mais minuciosa e detalhada de um determinado ambiente. Para tal, foi desenvolvida e implementada uma metodologia, Figura 2, capaz de receber e processar um áudio e utilizar modelos de ML para detalhar/classificar com precisão a origem da maioria dos sons medidos.

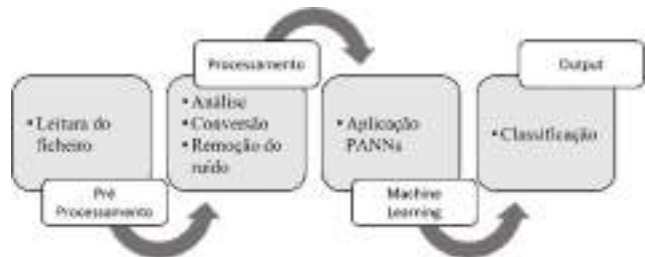


Figura 2: Metodologia para recolha e processamento de áudios.

Para esta componente de desenvolvimento foram estabelecidos alguns requisitos e pressupostos gerais, tais como:

- Alta precisão nas classificações sonoras;
- Grande quantidade de classes que podem ser identificadas;
- Escalabilidade;
- Possibilidade de melhorias nas classificações;
- Capacidade de adicionar novas classes de sons a identificar;
- Rapidez de resposta.

Um dos requisitos definidos foi a necessidade de existir um treino personalizado do modelo de ML para novas classes que não estejam presentes no *dataset* original. Ruídos específicos da indústria, ou de um ambiente novo, para o qual o modelo não tenha referência exigem um estudo e classificação prévia do ruído local, de forma a treinar o modelo na classificação destas novas classes.

A fim de solucionar esta restrição foi aplicada a técnica designada por *transfer learning* [8] que permite adaptar um modelo já previamente treinado, *i.e.* com algum conhecimento do domínio do problema, para um novo conjunto de dados ou novas classes. Quando esta técnica é utilizada, o conhecimento adquirido anteriormente é reaproveitado, facilitando a adaptação ao novo desafio e, conseqüentemente, havendo assim uma transferência de conhecimento e uma aprendizagem mais rápida e requerendo muito menos dados de treino.

Deste modo, e como referido anteriormente na secção 2, o modelo de ML recaiu sobre a rede neuronal PANNs (2020) [6], treinado e otimizado para reconhecimento de múltiplos padrões em ficheiros áudio e que também permite a utilização de *transfer learning*.

5. RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados foram obtidos pela plataforma num caso de estudo em que se instalaram 3 estações de monitorização, que mediram em contínuo durante vários meses junto aos limites de uma instalação fabril.

Os sonómetros foram colocados no terreno e conectados por 4G à plataforma digital integrada MIRA. Os valores de ativação dos *triggers* para iniciar a gravação de áudio foram definidos em cada sonómetro, e os valores para geração de alertas (email e/ou sms) foram definidos na plataforma digital integrada. Através desta deu-se início à tarefa de avaliação e monitorização de ruído ambiental da qual provieram os resultados apresentados em seguida.

Ao iniciar uma monitorização, pode-se visualizar o gráfico das diferentes métricas e espectros em *real time* assim como os eventos desencadeados através do *trigger* configurado no sonómetro, como ilustrado na Figura 3.

Pode ainda ser visualizado o histórico de um trabalho, onde é acessível informação como: Gráficos históricos das métricas e dos espectros, listagem de eventos e sua classificação, listagem de alertas emitidos, entre outros, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 3: Gráfico de métricas e eventos em tempo real.



Figura 4: Gráfico de histórico das métricas e eventos.

Informação relativa aos eventos desencadeados pelos *triggers* é acessível no separador *Events* onde são disponibilizadas três versões do ficheiro áudio recolhido pelo sonómetro, (1) com e (2) sem redução de ruído de fundo e (3) ficheiro original, assim como as classes identificadas no processamento do ficheiro conforme ilustrado na Figura 5. É também possível pesquisar eventos por intervalo temporal assim como por tipo de ruído detetado, *e.g.* martelo pneumático ou vento.



Figura 5: Visualização do histórico de eventos desencadeados ao longo da execução de uma monitorização.

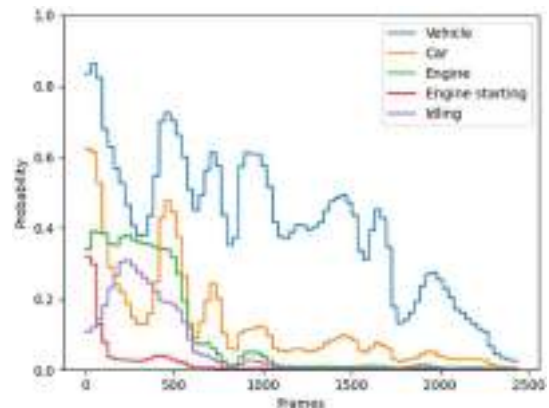


Figura 6: Representação temporal do output do modelo de ML.

Foram analisadas as deteções da origem de ruído dos excertos de áudio recolhidos pelos sonómetros aquando da ativação dos *triggers*. O resultado do processamento do modelo de ML é representado sobre a forma probabilística do ruído corresponder a uma determinada classe conhecida pelo

EVALUATION OF A PERSONAL SOUND ZONE SYSTEM IMPLEMENTED WITH LOW-COST MULTIMEDIA DEVICES

Mathys Daniel¹, Daniel De La Prida², Laura Fuster³, Gema Piñero^{3*}, Luis A. Azpicueta-Ruiz²

¹ENSEA, Cergy, Francia

²Universidad Carlos III, Madrid, España

³Universitat Politècnica de València, Valencia, España

ABSTRACT

In a personal sound zone (PSZ) system, the subjective quality of the audio reaching the bright zone depends on the accuracy of the estimation of the acoustic response between each loudspeaker and the listener's position, known as the room impulse response (RIR). Typically, the estimation of the RIR must be carried out at a stage prior to the implementation of the PSZ system, using quasi-professional equipment. However, we use multimedia devices every day that could also perform RIR estimation, such as a smartphone connected to a wireless loudspeaker. This paper presents a comparison of a PSZ system for three sets of RIRs estimated by: 1) an Android device connected to a Bluetooth loudspeaker, 2) an array of Brüel&Kjaer (BK) microphones and the same loudspeaker, 3) an array of BK microphones and an array of JBL loudspeakers. The evaluation is performed using objective metrics and a subjective psychoacoustic test.

Keywords — Estimation of room impulse responses, Bluetooth loudspeakers, personal sound zones.

1. INTRODUCTION

The quest for personalized audio experiences within shared enclosures has paved the way for extensive research in acoustics, giving rise to the development of Personal Sound Zone (PSZ) systems [1]. This innovative application can create distinct and tailored audio regions within shared spaces, ensuring that each listener perceives sound according to their preferences, all without disturbing those around them. At the heart of the successful implementation of PSZ systems lies the critical process of accurately estimating the Room Impulse Response (RIR) between a set of loudspeakers and the positions of listeners.

RIR estimation for PSZ systems has predominantly relied upon the use of professional equipment. This approach ensures the capture of high-fidelity data, making it the gold standard for RIR estimation. However, the increasing ubiquity of multimedia devices in our daily lives has sparked an intriguing exploration: Can everyday gadgets and tools effectively estimate the RIR, at least for the purpose of building PSZs? Specifically, can a smartphone wirelessly connected to a Bluetooth loudspeaker be a feasible alternative to high-quality microphones and loudspeakers?

The goal of the work here presented is to compare the accuracy of RIR estimates achieved through these two (high-quality and low-cost) systems when they are used to design the filters required by the PSZ system. For this purpose, we will evaluate the mostly used Acoustic Contrast (AC) [2] to assess the quantitative performance of each set of RIR estimates. In parallel, we have carried out a psychoacoustic test where participants can evaluate their audio quality perception when the PSZ system is designed upon the RIR collected through each method.

The rest of the paper is as follows: Section 2 explains the methodology employed for data collection and analysis. We will present our findings in detail, offering valuable insights into the advantages and limitations of each RIR estimation method. Section 3 deals with the required preprocessing of the data to build a PSZ system. Section 4 presents the objective and subjective results, while Section 5 highlights the main conclusions of our study.

2. DATA COLLECTION

Three different collections or sets of impulse responses have been estimated for the same locations and with the same estimation method based on emitting a logarithmic chirp and

* **Autor de contacto:** gpimvero@iteam.upv.es

Copyright: ©2023 Daniel Mathys et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This work has been partially funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and “ERDF A way of making Europe” through Grant PID2021-124280OB-C21.

estimating the RIR through a decorrelation process. This method has shown to have the least estimation error [3]. Fig.1 shows the setup of the PSZ application, where two zones of 21x21 cm have been measured with a distance of 7 cm between microphones. The loudspeaker array is formed by 8 loudspeakers separated 18 cm apart. In total, 256 (16x2x8) RIR measurements were conducted. Fig.1 also includes the distances of the loudspeaker and microphone arrays from the left wall of the room, and the distance between the first loudspeaker (from the left) and the left upper corner microphone of “Zone 1”, whose RIR will be considered as the reference RIR in Section 3.

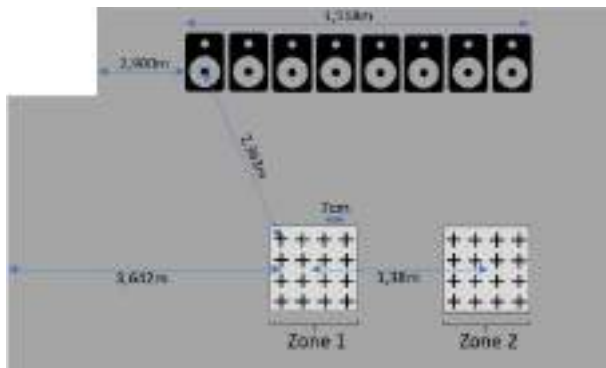


Figure 1. Data collection setup.

The distance between the respective central location of the two zones is 1,38 m. The whole room has dimensions 11,85x7,3x3 m and is mainly used as a laboratory. There are several tables, chairs, and other equipment all around the lab. Moreover, the wall at the south of the zones in Fig.1 is entirely made of crystal. The room presents an average reverberation time of $T = 0,5$ s. Three different combinations of devices and instrumentation has been used to estimate the RIRs, which will be explained in the following.

2.1. Android-based RIR Measurements

In this setup, the RIRs have been estimated using an Android tablet paired with a Bluetooth (BT) speaker. The tablet is a Samsung Galaxy Tab S3 and the BT loudspeaker model is a Yamaha NX-P100. The Bluetooth version is 2.1, which is quite old with respect to the latest 5.4 version [4], but as it will be explained in Section 3, BT random delays have been compensated and only the quality of the estimated RIRs will be considered in our study.

Fig.2 presents the Yamaha loudspeaker placed over two cardboard boxes at the 3rd position of the array. The boxes helped to place the loudspeaker membrane at a similar height as those of the professional array that will be described in Section 2.2.



Figure 2. Yamaha loudspeaker at the 3rd position of the professional array.

We have developed a proprietary app for Android devices able to perform the whole RIR estimation: It allows the user to connect to any available BT loudspeaker, and when it is ready, the tablet sends a chirp to the loudspeaker, records the sound emitted by the speaker with its built-in microphone, and obtains the RIR of the recorded signal through decorrelation.

Since there was only one tablet and one loudspeaker, we had to assure the accurate position of the tablet in the grid shown in Fig.1 for both zones. Therefore, we built a light structure of 1x1m (see Fig.3) that could be arranged to place the tablet in any point of the grid. These rails were marked at 7 cm intervals for both X and Y dimensions, such that the tablet microphone was located at the exact positions shown in Fig.1 for Zones 1 and 2.

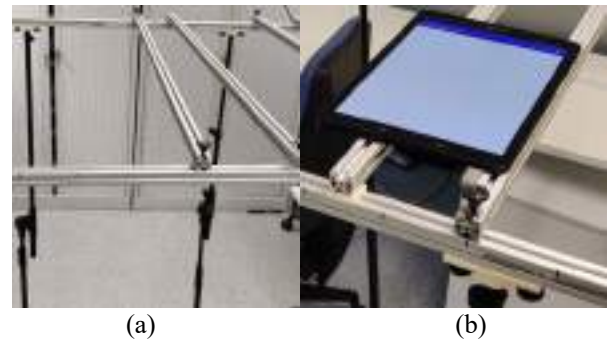


Figure 3. (a) Structure with holders and rails. (b) Tablet setting.

Summarizing, the steps carried out to obtain the RIRs have been: 1) the BT loudspeaker was placed in one of the positions of the professional array, as shown in Fig.2; 2) the structure shown in Fig.3 was placed in Zone 1 and all the corresponding RIRs were estimated; 3) the structure was moved to Zone 2 and all the corresponding RIRs were estimated. This process was repeated for all designated loudspeaker positions.

2.2. High-quality (HQ) RIR Measurements

In this setup, high-quality instrumentation has been used to estimate the RIRs. The microphone array is formed by Brüel&Kjaer type 4958 transducers, whereas JBL LSR305 loudspeakers, which present an accurate flat frequency-

response, were employed, as shown in Fig.2. For this setup, the 16 microphones (shown in Fig.4), and the 8 loudspeakers were connected to a professional soundcard. They were perfectly synchronized, which allowed to compute all the RIRs simultaneously. For this purpose, a specific Matlab application have been developed, effectively reducing time and error in the measurement process.



Figure 4. Rectangular array with Brüel&Kjaer type 4958 microphones.

2.3. Hybrid RIR Measurements

This setup is denoted as “hybrid configuration” because it uses the array of 16 Brüel&Kjaer microphones shown in Fig.4 connected by wire (through a soundcard) with the Yamaha NX-P100 loudspeaker. The 16 microphone positions for each zone were simultaneously estimated with the Matlab software as well.

3. DATA PREPROCESSING

The RIRs measured using the BT (wireless) connection suffered from a random delay inherent to the Bluetooth protocol. Although the Bluetooth standardization body has done a great effort to reduce its latency [4], the major drawback in Bluetooth communications is that each time a transmission starts, the latency, or delay, is random. To show how serious this problem is, consider a first transmission with an initial latency of 20 ms. Then stops transmitting and starts again a second transmission with an initial latency of 25 ms. This small difference of 5 ms is equivalent to moving the speaker 1,72 m apart from the microphone position, assuming the speed of sound being 345 m/s.

Therefore, we had to compensate the random delay introduced by the BT connection to preserve the coherence among the measured RIRs. For this purpose, we proposed two different pre-processing techniques.

3.1. Ideal delay computation based on the cross-correlation

Since a set of RIRs that have been estimated using a soundcard with almost perfect synchronization is available, we can compute any real delay between two different microphone positions given a fixed loudspeaker, or alternatively between two loudspeakers positions, given a fixed microphone.

Therefore, we firstly state one of the RIRs as the reference RIR, and secondly, we compute the relative delay (1) of the rest of the RIRs with respect to the reference by means of

$$\tau_{ij} = \max_{\tau} \frac{1}{2N+1} \sum_{\tau=-N}^N h_{ij}(n) h_{ref}(n + \tau), \quad (1)$$

where $h_{ref}(n)$ is the reference RIR, $h_{ij}(n)$ is the estimated RIR between the i th microphone and the j th loudspeaker and τ_{ij} is the relative delay calculated as the position (τ) of the maximum of their estimated cross-correlation function.

3.2. Ideal delay computation based on the devices' location

As shown in Fig.1, precise measurements of the location of the devices within the room are available. The reference RIR has been taken as the one between the first loudspeaker at the left side of the array and the microphone of Zone 1 located at the left upper corner of the array in Fig.1. The relative delay is calculated as an iterative process starting from the reference loudspeaker numbered as #1, calculating the difference between two distances: between speaker #1 to microphone #1 (reference) and between speaker #1 to microphone # i . The speed of the sound divided by this difference gives the relative delay τ_{i1} . This process is repeated with the rest of loudspeakers and all the microphones till all delays are computed.

3.3. Delay compensation

As a final step, the real random delays between the RIRs measured by the low-cost system of Section 2.1 are calculated using (1) and then compensated by adding or dropping as many zero samples as required to the measured RIRs, such that the resulting RIRs match the ideal delay computed above.

3.4. Comparison of estimated RIRs

Fig.5 shows an example of the estimated RIR between the 4th loudspeaker and the 6th microphone for each zone. Left side corresponds to “Zone 1” and right side to “Zone 2”. It can be noticed that the RIRs obtained by the low-cost devices present a different delay, whereas the other two sets of RIRs are synchronized. To further investigate the differences between the three collections, Fig.6 shows the absolute value

of the $h_{ij}(n)$ of Zone 1 shown in the left side of Fig.5. The y axis is depicted in logarithmic scale.

The RIR estimated with the tablet presents an abrupt fall compared to the other two RIRs, and its energy remains on a constant level of -20 dB along the time. This behavior indicates that the microphone of the tablet introduces significant noise in the decorrelation of the recorded signal. Regarding the differences between the RIR obtained by the hybrid system and the high-quality (HQ) system, Fig.5-6 show a lower density of captured reflections in HQ.

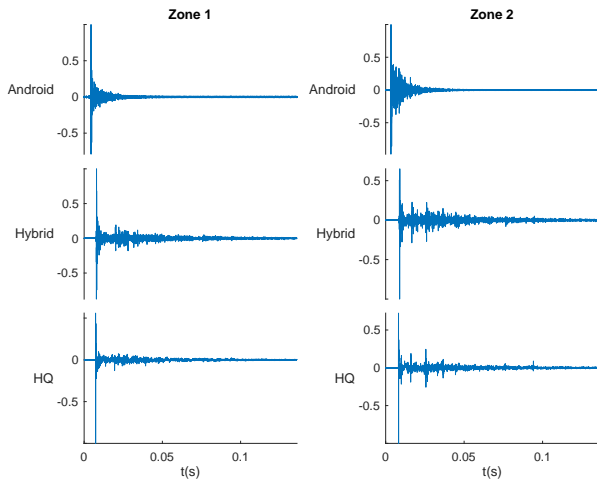


Figure 5. Measured RIRs between the 4th loudspeaker and the 6th microphone of each zone. Left side corresponds to “Zone 1” and right side to “Zone 2”.

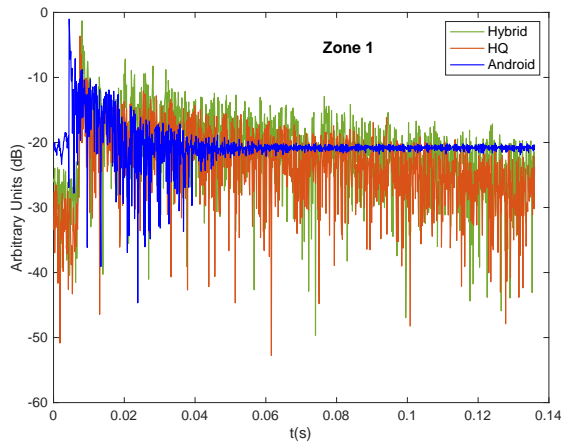


Figure 6. Logarithmic magnitude of the RIRs of Zone 1 shown in the left side of Fig.5.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, we will compare the performance of a PSZ system when the related RIRs have been estimated via one of the combinations of microphones and loudspeakers described in Section 2. Since for the case of the Android device, the delays have been compensated using two different approaches, a total of four different sets of RIRs will be compared.

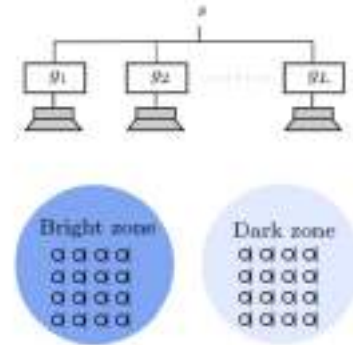


Figure 7. Personal Sound Zones system.

4.1. Personal Sound Zones

As shown in Fig.7, a PSZ system is designed such that it delivers the sound s to a zone, called the “bright zone”, and tries to cancel it in another zone, called the “dark zone”. For this purpose, a set of L finite impulse response (FIR) filters, one per loudspeaker, is designed according to the following optimization function [5]:

$$g = \min_g \left\{ \underbrace{x_d^T x_d}_{\text{Energy dark}} + \underbrace{\|x_b - d_b\|^2}_{\text{Error bright}} + \lambda \underbrace{g^T g}_{\text{Filter's Energy}} \right\} \quad (2)$$

where g is the matrix of the filters of dimensions $L_f \times L$, being L_f the length of the FIR filters and L the number of loudspeakers, λ is a regularization parameter, d_b is the desired response in the bright zone (usually the RIR from one of the central loudspeakers), and x_b and x_d are the combined acoustic responses at the bright and dark zones respectively, that is, $x_b = g * h_b$ and $x_d = g * h_d$, where h_b and h_d are the set of RIRs between the loudspeaker array and the microphone array of the bright and dark zones, respectively.

4.2. Filter computation in the PSZ system

As stated above, the design of the PSZ filters depends on the set of estimated RIRs (h_b , h_d) implicitly used in (2). Moreover, the set of filters comprises two subsets: one set of filters must be designed for the Zone 1 acting as the bright zone and Zone 2 as the dark one, which we denote by g_1 , and another set of filters, g_2 , is designed for the reverse condition where Zone 2 is the bright zone and Zone 1 the dark one.

Consequently, two sets of filters have been computed for each collection of RIRs described in Sections 2 and 3.

4.3. Objective comparison: acoustic contrast

The acoustic contrast (AC) is the most used metric to assess the performance of a PSZ system. It is defined as [6]:

$$AC = \frac{E_b}{E_d} = \frac{E[x_b^T x_b]}{E[x_d^T x_d]} \quad (3)$$

where E_b and E_d are the average energy gains that would enhance (or attenuate) the sound s of Fig.7 at the bright and dark zones, respectively. The AC can be computed in frequency for every bin or, alternatively, by averaging 1/3-octave bands to improve the readability of the results [7].

To perform a fair comparison among the different collections of RIRs and considering that a personal sound zone is intended to give a perceptual experience of the sound at that location, we have measured an additional set of binaural RIRs at each zone using a Neumann KU100 dummy head. Therefore, the AC (3) is computed using the set of filters for each RIR collection, but using the binaural RIRs to compute the combined acoustic responses \mathbf{x} :

$$\mathbf{x}_z^{\text{set}} = \mathbf{g}^{\text{set}} * \mathbf{h}_{\text{binaural},z} \quad (4)$$

where “set” denotes the RIR collection and z can be b (bright) or d (dark).

Fig.8 and Fig.9 show the averaged AC in frequency when Zone 1 and Zone 2 are the bright zone, respectively. The frequency axis is depicted in logarithmic scale in the range [125, 2000] Hz, since the loudspeaker separation introduces aliasing above 1kHz. It can be noticed that Zone 1 (Fig.8) presents higher AC values at very low frequencies than Zone 2 (Fig.9), but from 200 Hz on, both zones achieve similar contrast. Regarding the comparison between RIRs measurements, the filters computed from the RIRs obtained with the high-quality instrumentation (“HQ”) show, in average, AC values 5 dB above those from the rest of sets. The filters computed from the RIRs obtained through the “Hybrid” set present a good behavior in very low frequencies but achieve a poor AC value of 5 dB in the range of 1kHz, where our hearing system is more sensitive.

Finally, the filters computed from the RIRs obtained by the tablet and the BT loudspeaker (“Android”) behave very similar independently if the random delays were compensated by computing the cross-correlation (“corr”) or from their locations (“theo”) (see Section 3). Both present a poor behavior at very low frequencies, but obtain good contrast around the most sensitive frequencies, outperforming the “Hybrid” set. Therefore, we can conclude

that the RIRs obtained by the low-cost devices can achieve good AC values when used in the design of PSZ systems.

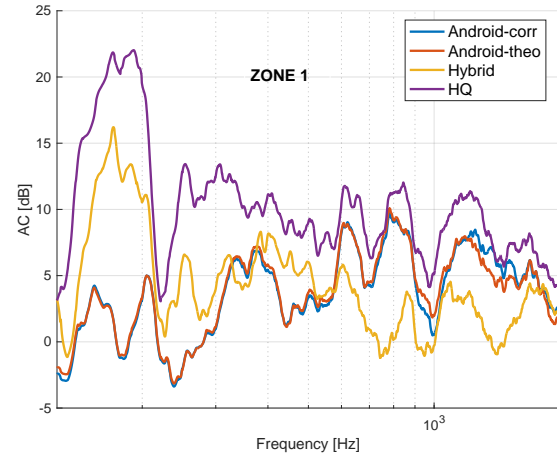


Figure 8. Acoustic Contrast in Zone 1.

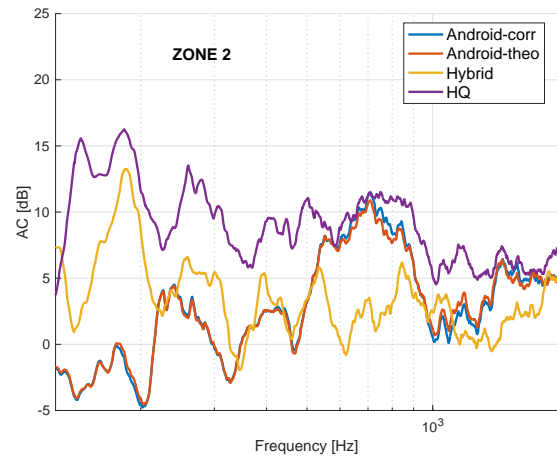


Figure 9. Acoustic Contrast in Zone 2.

4.4. Subjective comparison: Psychoacoustic test

A subjective test has been carried out to assess the performance of the four RIR collections by evaluating the audio quality delivered to the zones by the PSZ system. We have added a fifth profile where no filter is used, that is, simulating that the PSZ system is off.

The stimuli of the test consisted in two speech signals, one male voice and one female voice, both recorded in an anechoic chamber and speaking Spanish. The duration of each stimulus was 8 s and the sampling frequency was $f_s=44100$ Hz. They were generated such that Zone 1 would be the bright zone for the male voice and Zone 2 the bright zone for the female one, using the combined acoustic response in (4) for each set and zone. The test was carried out by 14 participants for Zone 1 and 15 participants for Zone 2. All of them indicated no hearing loss and their repetibility and

consistency were considered valid (thresholds of 50% for repetibility and 75% for consistency).

The test has been carried out using the Two-Alternative Forced Choice (2-AFC) protocol, where two different stimuli (audio signals) were presented to the assessors, and they had to choose one of them according to the following question: “Which of the two audio signals has the least interfering voice?”. Therefore, the participants evaluated which of the audios were perceived with minimum interference, thus, with better quality.

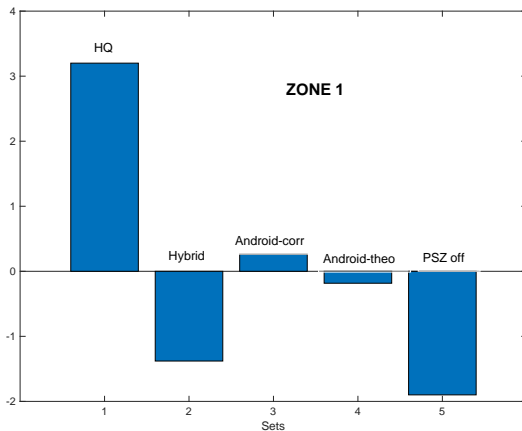


Figure 10. Preference for the audios obtained in Zone 1.

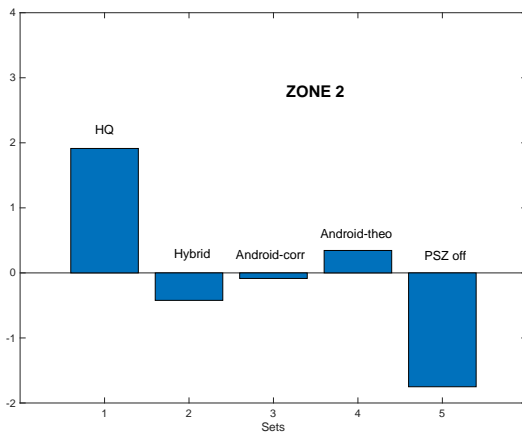


Figure 11. Preference for the audios obtained in Zone 2.

Fig.10 and Fig.11 show the value of merit (VoM) of each of the audio signals presented in the jury test. The VoM of an audio signal relates to the number of times that the audio has been chosen compared to the rest of signals. Another significant characteristic is that the sum of all the values of merit is 1. Therefore, if an audio signal has a positive VoM means that it has been chosen more often than other with a negative VoM, but if the range of the minimum VoM to the maximum VoM is wide, it means that most of the participants agree with that selection. In this sense, the range of VoM is

larger for Zone 1 (Fig.10) compared to that exhibited by Zone 2 (Fig.11), that is, most juries would agree on the results shown for Zone 1. Regarding the comparison among the four PSZ designs, “HQ” obtained the best perceived audio quality. Surprisingly, the PSZ system that uses the “Hybrid” RIRs is almost comparable to doing nothing in Zone 1, although in Zone 2 performs like both “Android” collections. This behavior can be related to the AC shown in Fig.8-9 by the “Hybrid” set, which was much lower than the ACs of the “Android” and “HQ” sets around the sensitive band of 1kHz.

Therefore, we can state that estimating RIRs with smartphones or tablets connected to Bluetooth loudspeakers, can be a rough but cost-efficient alternative to the use of professional instrumentation when designing PSZ systems.

5. CONCLUSIONS

The estimation of the room impulse responses (RIRs) required to design a personal sound zones (PSZ) system are usually obtained using professional/high-quality equipment, which is expensive and difficult to relocate. In this work, we have proposed an alternative low-cost system comprising an Android tablet and a Bluetooth (BT) loudspeaker to estimate the desired RIRs. We have studied the performance of both systems, together with a hybrid approach, when used to design a PSZ system. The evaluation has been carried out using an objective metric (acoustic contrast) and a subjective psychoacoustic test. Surprisingly, the low-cost system performs better than the hybrid one and can be a realistic cost-efficient alternative to professional instrumentation.

6. REFERENCES

- [1] T. Betlehem, W. Zhang, M. A. Poletti and T. D. Abhayapala, "Personal Sound Zones: Delivering interface-free audio to multiple listeners," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 32, no. 2, pp. 81-91, March 2015.
- [2] S. J. Elliott, J. Cheer, J. -W. Choi and Y. Kim, "Robustness and Regularization of Personal Audio Systems," in *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 2123-2133, Sept. 2012.
- [3] G. B. Stan, J. J. Embrechts, and D. Archambeau, "Comparison of different impulse response measurement techniques," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, no. 4, pp. 249-262, 2002.
- [4] Aza, A., Melendi, D., García, R. *et al.* "Bluetooth 5 performance analysis for inter-vehicular communications.," *Wireless Netw*, 28, 137–159, 2022.
- [5] Moles-Cases, V., Piñero, G., de Diego, M., Gonzalez, A., "Personal Sound Zones by Subband Filtering and Time Domain Optimization". *IEEE/ACM Tran. on Audio, Speech, and Lang. Proc.*, 28, 2684–2696, 2020.
- [6] Choi, J.-W., Kim, Y.-H., "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources." *J. Acoust. Soc. Am.* 111 (4): 1695–1700, 2002.
- [7] P. D. Hatziantoniou, J. N. Mourjopoulos, "Generalized Fractional-Octave Smoothing of Audio and Acoustic Responses," *J. Acoust. Soc. Am.* 48 (4): 259-280, 2000.

LÍQUIDOS VISCOELÁSTICOS COMO FILTROS PASO BANDA EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS DE CIZALLA

Jorge Torres Perez^{1*}
Gabrielle Laloy-Borgna²
Guillermo Rus Carlborg¹
Stefan Catheline²

¹Ultrasonics Lab (TEP-959), Departamento de Mecánica de Estructuras, Universidad de Granada, Granada, España

²LabTau (INSERM), Lyon, Francia

RESUMEN

Desde una perspectiva acústica, medios como los líquidos viscoelásticos, que contienen estructuras internas como cadenas poliméricas, se ha demostrado que pueden fluir o deformarse como sólidos dependiendo de la escala temporal de deformación. En este estudio, se exploraron los rangos de frecuencia para los que un medio se considera como sólido clásico, donde las ondas de cizalla se propagan, o líquido, donde las ondas de cizalla no se propagan. Una solución acuosa de goma xantana a diferentes concentraciones se convirtió en un líquido viscoelástico. La generación y seguimiento de ondas de cizalla se realizó mediante elastografía dinámica con un sistema de investigación Verasonics, utilizando la fuerza de radiación acústica (ARF) como fuente de excitación. Con un método de transformada de Fourier 2D se estimaron la velocidad de fase y la atenuación, y con ello se reconstruyeron los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G''). Este medio podría considerarse como un filtro pasa banda con bandas de transición para las ondas de cizalla. El modelo reológico de Jeffreys se ajustó con precisión a la respuesta del medio en casi todo el rango de frecuencias.

ABSTRACT

From an acoustic standpoint, substances like viscoelastic liquids, which have internal structures like polymer chains, can exhibit both fluid-like and solid-like behavior depending on the time scale of deformation. This study delves into the frequency ranges that define whether a substance behaves as a classic solid, allowing shear waves to propagate, or as a liquid where shear waves remain restricted. To conduct this research, an aqueous solution of xanthan gum at varying concentrations was transformed into a viscoelastic liquid. We

applied dynamic elastography, utilizing a Verasonics research system with acoustic radiation force (ARF) as the excitation source, to generate and track shear waves. A 2D Fourier transform method was then employed to deduce phase velocity and attenuation, enabling the reconstruction of the storage modulus (G') and loss modulus (G''). In essence, this medium acted akin to a bandpass filter with transition bands for shear waves. The rheological Jeffreys model was employed to precisely align with the medium's response over nearly the entire frequency range.

Palabras Clave— líquidos viscoelásticos, elastografía, frecuencia de corte.

1. INTRODUCCIÓN

Inicialmente, un sólido se define como un medio en el cual las ondas de cizalla de volumen pueden propagarse, ya que existe una relación física directa entre este tipo de ondas y el módulo de cizalla [1]. En contraste, en un líquido con módulo de cizalla cercano a cero, a menudo no se observa la propagación de ondas de cizalla de volumen.

Por su parte, existen materiales complejos, como los que combinan una fase líquida con estructuras internas como cadenas de polímeros, que soportan la propagación de ondas de cizalla. Comúnmente se les denomina líquidos viscoelásticos, lo que implica que pueden fluir o deformarse como sólidos dependiendo de las escalas de longitud y tiempo de la deformación [2].

La evaluación experimental de estos líquidos se ha realizado principalmente mediante medidas de reometría rotativa. El problema es que debido a los efectos inerciales de los instrumentos a frecuencias superiores a varias decenas de Hz se limitan las frecuencias de análisis a < 20 Hz [3].

* **Autor de contacto:** geresez@ugr.es

Copyright: ©2023 Jorge Torres et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Para explorar frecuencias más elevadas se han empleado métodos de propagación de ondas de cizalla. Se han utilizado métodos ópticos, ultrasónicos o mecánicos para detectar ondas de corte en fluidos micelares [4]–[6]. En otro estudio de Gennisson et al. [7] monitorearon la coagulación de la sangre a lo largo del tiempo y detectaron el momento de transición de fase de líquido a sólido.

Estos estudios han dejado varias cuestiones abiertas sobre los fenómenos observados en líquidos viscoelásticos. Nosotros nos interesamos en estudiar mediante elastografía dinámica los rangos de frecuencia en los que un medio se considera un sólido clásico ($G' > G''$) o un líquido clásico ($G' < G''$), en otras palabras, transiciones de fase líquido-sólido. Asimismo, se probó la capacidad de diferentes modelos reológicos para predecir estas frecuencias de transición de fase.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para crear un líquido viscoelástico se disolvió goma xantana (XG) en agua, proceso que crea una estructura polimérica interna en el líquido [8]. Se calentó agua destilada y se añadió una mezcla de XG y grafito, con concentraciones de 0.5% y 0.1% (w/w), respectivamente, mientras se agitaba magnéticamente durante 30 minutos. Tras esto se desgasificó el medio. El grafito se usó para proporcionar dispersión acústica.

La generación y seguimiento de ondas de corte se realizó mediante elastografía dinámica con un sistema de investigación Verasonics (Vantage 256, USA) y una sonda lineal L11-5v (Figura 1). La excitación se realizó mediante un push de fuerza de radiación acústica (ARF) para provocar una respuesta de ancho de banda amplio [9]. Los parámetros de ARF fueron 1000 ciclos, frecuencia central de 7.6 MHz y distancia focal de 25 mm. Inmediatamente después, se realizó una imagen ultra rápida utilizando ondas planas con una frecuencia de 3 kHz. Para eliminar el efecto del ruido aleatorio, se promediaron 10 adquisiciones consecutivas.

El campo de desplazamiento se reconstruyó utilizando un algoritmo de seguimiento de fase [10] (Figura 2a). Se aplicó un filtro direccional y un filtro de frecuencia espacial para remover componentes con velocidades superiores a 0.5 m/s [11]. La atenuación geométrica se tuvo en cuenta multiplicando la amplitud de señal por la distancia al origen del push (\sqrt{r}). Se promedió en una región de interés a la derecha del push y se mediante diferenciación temporal se obtuvo el perfil de velocidad de partícula (Figura 2b).

Para detectar las frecuencias de transición de fase de líquido a sólido, en primer lugar, se estimaron la velocidad de fase y atenuación mediante la transformada de Fourier 2D [12]. Los datos espacio-temporales reconstruidos ($v_z(t,x)$) se transformaron al espacio $\tilde{v}_z(f,k)$. El modo de propagación principal se determinó identificando pares de número de onda k y frecuencia f asociados con los valores máximos de amplitud.

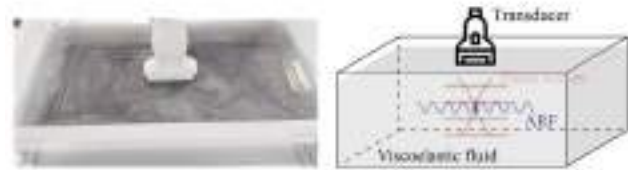


Figura 1. Izquierda: Solución de XG con partículas de grafito. Derecha: Setup experimental combinando ARF + ondas planas.

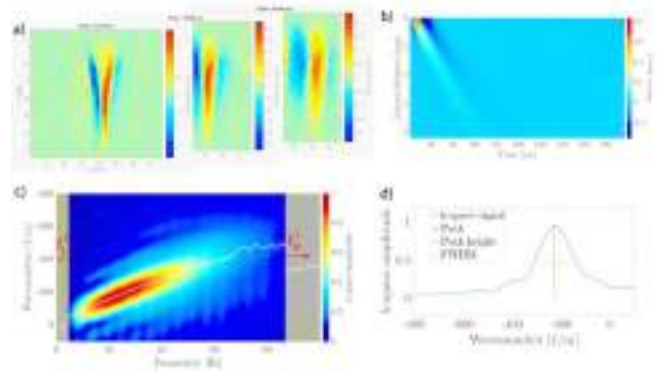


Figura 2. a) Propagación de la onda de cizalla a 16, 48 y 96 ms. b) Mapa de velocidad de partículas para una muestra del 0,5%. c) Espacio (f,k) que muestra los picos (puntos blancos) que corresponden a la velocidad de fase para cada frecuencia, y las zonas de frecuencia de corte. d) Cálculo de FWHM a 30 Hz para la estimación de la atenuación.

Las frecuencias de corte, cuando se consideró que no había una propagación de ondas de cizalla detectables, se determinaron cuando hubo cambios abruptos en la información del modo de propagación principal (Figura 2c). La Ec. 1 se obtuvo para obtener la velocidad, y la Ec. 2 para calcular la atenuación, como se muestra en la Figura 2d. La Ec. 3 muestra las expresiones para calcular G' y G'' .

$$c_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad (1)$$

$$\alpha = FWHM \frac{\pi}{3} \quad (2)$$

$$G^* = G' + iG'' = \rho \left(\frac{\omega}{\omega/c_{ph} + i\alpha} \right)^2 \quad (3)$$

Se propusieron cuatro modelos reológicos (Kelvin-Voigt, Maxwell, Jeffreys y Extended Maxwell) para explicar el comportamiento observado. Para estimar los parámetros de los modelos se ajustó la curva de dispersión aplicando, se aplicó un método de ajuste no lineal. Luego, los parámetros ajustados se utilizaron para calcular la respuesta del modelo para G' y G'' .

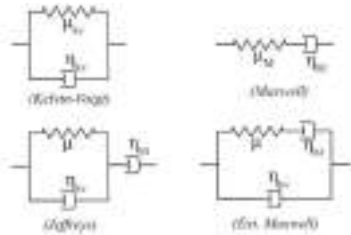


Figura 3. Modelos reológicos propuestos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La curva de dispersión se muestra en la Figura 4, junto con la atenuación calculada. Se obtienen velocidades muy bajas, en torno a 0.15 m/s, pero coherentes con las obtenidas en otros fluidos viscoelásticos [5], [6]. Las frecuencias de corte detectadas son 5 Hz (f_L^c) y 73 Hz (f_H^c). Se utilizó una adquisición de 10 s para permitir el tiempo suficiente de capturar ondas a tan baja frecuencia para confirmar f_L^c . En la misma figura se observa como la atenuación es creciente en todo el rango de frecuencia.

El ajuste de los cuatro modelos reológicos propuestos se muestra en la Figura 5. El modelo KV se utiliza con frecuencia para explicar comportamientos tipo sólido. Parece ser compatible en casi todo el rango, pero hay discrepancias significativas en frecuencias por debajo de 20 Hz. Por su parte, el modelo Mx a menudo describe líquidos. Sabiendo que el modelo Mx tiende a estabilizarse a altas frecuencias, el ajuste se realizó solo hasta 20 Hz. Se encuentra que este modelo reproduce adecuadamente los valores a bajas frecuencias.

Estos modelos reológicos simples no pueden el comportamiento en todo el espectro de frecuencias. El modelo de Maxwell extendido [6] consiste en conectar en paralelo un amortiguador con un modelo Mx. También se puede obtener conectando en serie un amortiguador con un KV, que es el modelo de Jeffreys, también llamado modelo estándar de líquido lineal. Este par de modelos sigue la misma ecuación constitutiva, pero con coeficientes diferentes. En este caso se aprecia como el modelo de Jeffreys describe correctamente las curvas experimentales. Los parámetros del modelo Jeffreys son $\mu=16.774$ Pa, $\eta_{kv}=0.042$ Pa·s, y $\eta_M=0.381$ Pa·s, en línea con los valores de los modelos simples. Esto permite sugerir que el modelo de tres elementos de Jeffreys se puede aproximar como un modelo Mx a bajas frecuencias, y un modelo KV a altas frecuencias. El modelo Extended Maxwell (línea verde en la Figura 5) se superpone perfectamente en todas las curvas del modelo Jeffreys, verificando que representan el mismo sistema, pero con diferentes parámetros.

La Figura 6 muestra el comportamiento del módulo complejo de cizalla. Para una frecuencia menor de 10 Hz (f_1^T , primera frecuencia de transición), G'' es mayor que G' , lo que indica que el término disipativo domina sobre el término de almacenamiento, y el medio se considera un líquido. Luego,

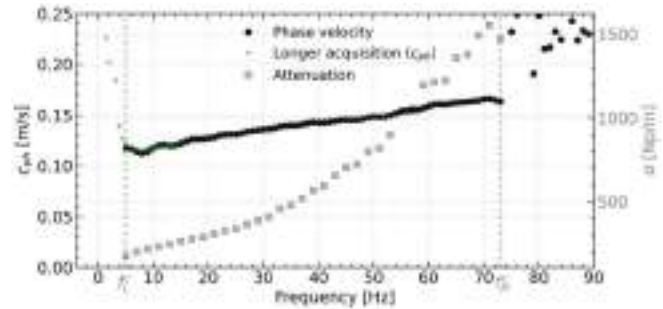


Figura 4. Curva de velocidad de fase con líneas verticales que representan las frecuencias de corte detectadas en el setup. La atenuación en función de la frecuencia está representada en el eje derecho.

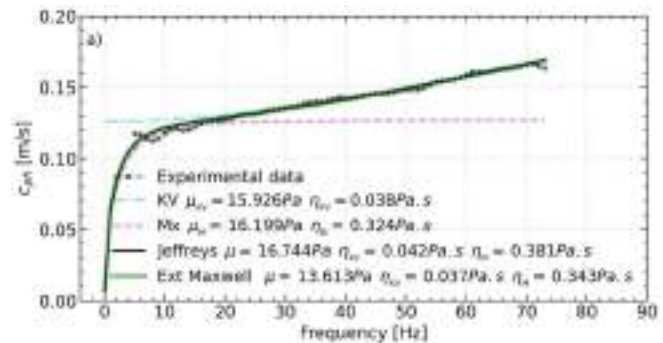


Figura 5. Curva de velocidad de fase junto con el ajuste de varios modelos reológicos.

el término G' domina hasta un segundo punto de cruce alrededor de 55 Hz (f_2^T , segunda frecuencia de transición), y el medio se puede considerar un sólido entre 10-55 Hz. Más allá de este rango intermedio, las ondas de corte comienzan a atenuarse nuevamente de manera significativa, y el medio se considera un líquido ($G''>G'$). En consecuencia, el medio investigado se comporta como un filtro pasa banda con bandas de transición. Por lo tanto, el ancho de banda de la fase sólida (10-55 Hz) define la región de atenuación mínima para la amplitud de la onda.

En las fases líquidas ($G''>G'$), los datos experimentales se desvían del modelo, lo que es atribuido a una fuerte atenuación. En la fase sólida ($G'>G''$), se observa que G' experimental se desvía del modelo a medida que aumenta la frecuencia. Estas diferencias pueden ser debidas a que el ajuste se realiza solo en c_{ph} y los pequeños errores se amplifican al transformarlos en G^* .

Aunque sería intrigante relacionar los parámetros reológicos estimados con la estructura interna del medio, en este momento es difícil dar una interpretación convincente. De manera simplificada, postulamos que la solución contiene una red de cadenas de polímero que muestran las características de un sólido KV. Este sistema reológico se coloca en serie con un amortiguador, para representar que el medio está incrustado en un fluido newtoniano, que es el modelo Jeffreys.

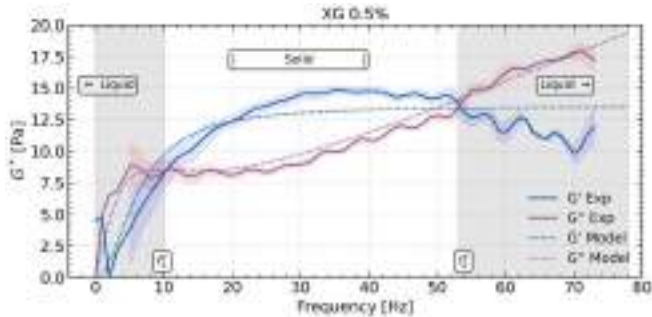


Figura 6. Módulos de almacenamiento experimental G' y pérdida G'' que representan zonas de transición de fase sólido-líquido. También se representa el ajuste del modelo de Jeffreys.

Es importante destacar que, aunque hay estudios de reometría que obtienen valores en el mismo rango que nosotros para G^* [13], [14], hay dificultades para realizar comparaciones directas entre los métodos de ondas de cizalla y la reometría. La reometría se centra principalmente en la viscosidad intrínseca de los componentes del medio y las interacciones de fricción entre ellos. En cambio, los métodos de ondas de corte también son sensibles a la microestructura. Cuando las ondas se propagan, experimentan dispersión debido a su interacción con la microestructura del medio. Además, la adición de dispersores acústicos puede influir en la atenuación y en la dependencia de la velocidad de propagación con respecto a la frecuencia.

4. CONCLUSIONES

El medio de XG estudiado ha exhibido un comportamiento de filtro de paso de banda, y se ha identificado la transición de fase de sólido a líquido a altas frecuencias. Este logro ha sido posible gracias a la amplia gama de frecuencias en la que pueden operar los métodos de ondas de cizalla, a diferencia de las limitaciones de la reometría rotacional. También se ha investigado las frecuencias de corte de las ondas de cizalla para mejorar la comprensión de la propagación de ondas en líquidos viscoelásticos. El estudio de las ondas de cizalla en líquidos viscoelásticos biológicos representa una herramienta prometedora para evaluar sus propiedades mecánicas. Este enfoque podría utilizarse para distinguir estados patológicos, como el síndrome de hiperviscosidad sanguínea o la viscosidad del esputo, con el fin de diagnosticar enfermedades respiratorias crónicas.

REFERENCIAS

[1] K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids*. Dover Publications, 1991.

[2] R. B. Bird, R. C. Armstrong, et O. Hassager, 'Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1, 2nd Ed.: Fluid mechanics', ian. 1987, Consultatus: 13 februarius 2023. [In linea]. Praestatus ad: <https://www.osti.gov/biblio/6164599>

[3] A. Kowalczyk, B. Hochstein, P. Stähle, et N. Willenbacher, 'Characterization of Complex Fluids at very low frequency:

Experimental Verification of the strain rate-frequency superposition (SRFS) method', *Appl. Rheol.*, t. 20, n. 5, p. 52340, 2010, doi: 10.3933/AppRheol-20-52340.

[4] H. Liu, P. Kijanka, et M. W. Urban, 'Acoustic radiation force optical coherence elastography for evaluating mechanical properties of soft condensed matters and its biological applications', *J. Biophotonics*, t. 13, n. 3, mar. 2020, doi: 10.1002/jbio.201960134.

[5] J. R. Gladden, A. M. Gamble, C. E. Skelton, et J. Mobley, 'Shear waves in viscoelastic wormlike micellar fluids over a broad concentration range', *J. Acoust. Soc. Am.*, t. 131, n. 3, pp. 2063–2067, mar. 2012, doi: 10.1121/1.3683538.

[6] C. Amador, B. L. Otilio, R. R. Kinnick, et M. W. Urban, 'Ultrasonic method to characterize shear wave propagation in micellar fluids', *J. Acoust. Soc. Am.*, t. 140, n. 3, pp. 1719–1726, sep. 2016, doi: 10.1121/1.4962531.

[7] J.-L. Gennisson, S. Lerouge, et G. Cloutier, 'Assessment by transient elastography of the viscoelastic properties of blood during clotting', *Ultrasound Med. Biol.*, t. 32, n. 10, pp. 1529–1537, oct. 2006, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2006.06.008.

[8] N. M. Eren, P. H. S. Santos, et O. Campanella, 'Mechanically modified xanthan gum: Rheology and polydispersity aspects', *Carbohydr. Polym.*, t. 134, pp. 475–484, dec. 2015, doi: 10.1016/j.carbpol.2015.07.092.

[9] A. Sarvazyan, T. J. Hall, M. W. Urban, M. Fatemi, S. R. Aglyamov, et B. S. Garra, 'An Overview of Elastography-An Emerging Branch of Medical Imaging', *Curr. Med. Imaging Rev.*, t. 7, n. 4, pp. 255–282, nou. 2011, doi: 10.2174/157340511798038684.

[10] N. Benech, S. Catheline, J. Brum, T. Gallot, et C. A. Negreira, '1-D elasticity assessment in soft solids from shear wave correlation: the time-reversal approach', *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, t. 56, n. 11, pp. 2400–2410, nou. 2009, doi: 10.1109/TUFFC.2009.1328.

[11] H. Zhao *et al.*, 'External Vibration Multi-Directional Ultrasound Shearwave Elastography (EVMUSE): Application in Liver Fibrosis Staging', *IEEE Trans. Med. Imaging*, t. 33, n. 11, pp. 2140–2148, nou. 2014, doi: 10.1109/TMI.2014.2332542.

[12] I. Z. Nenadic *et al.*, 'Attenuation measuring ultrasound shearwave elastography and in vivo application in post-transplant liver patients', *Phys. Med. Biol.*, t. 62, n. 2, p. 484, dec. 2016, doi: 10.1088/1361-6560/aa4f6f.

[13] Guler Bengusu Tezel, 'A Study on Tunable Viscoelastic Properties of Xhantan Gum and Sodium Alginate Hyrogelling System', *Theor. Found. Chem. Eng.*, t. 55, n. 3, pp. 464–471, mai. 2021, doi: 10.1134/S0040579521030210.

[14] G. P. Mota et R. G. Pereira, 'A comparison of the rheological behavior of xanthan gum and diutan gum aqueous solutions', *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, t. 44, n. 4, p. 117, apr. 2022, doi: 10.1007/s40430-022-03406-0.

VISCOSITY AND NONLINEAR ELASTOGRAPHY WILL BE THE NEXT GENERATION BIOMARKERS IN CLINICAL DIAGNOSIS

Guillermo Rus^{1*}

Antonio Callejas¹, Antonio Gómez¹, Inas Faris¹, Jorge Torres¹, Manuel Hurtado¹, Hirad Shamiminoori¹, Juan Melchor¹, Beatriz Blanco¹, Jose Luis Martín²

¹ Ultrasonics Lab (TEP959), Universidad de Granada
Unidad Científica de Excelencia MNAT
Instituto de Investigación Biosanitaria iBS Granada

² Servicio de Radiodiagnóstico, Hospital Universitario San Cecilio, Granada
Ultrasonics Lab (TEP959), Universidad de Granada

RESUMEN

Los últimos cambios en un tejido se asocian con un amplio espectro de patologías, que se derivan de la microestructura, la histología y la bioquímica del tejido. Esta presentación tiene como objetivo dilucidar el potencial de los parámetros elásticos viscosos y no lineales como biomarcadores mecánicos de diagnóstico concebibles. En primer lugar, proporcionando información sobre el papel de la microestructura de los tejidos blandos en la elasticidad lineal; segundo, al comprender cómo la viscosidad y la no linealidad podrían mejorar el diagnóstico actual en elastografía; y finalmente, combinando investigaciones preliminares de esos parámetros de elastografía dentro de diferentes tecnologías.

La caracterización por elastografía ultrasónica y la comprensión de los tejidos blandos se están desarrollando recientemente como una herramienta de diagnóstico clínico. Las nuevas tecnologías de sensores de elastografía, desde hardware hasta algoritmos, están destinadas a dotar de una nueva clase de biomarcadores que cuantifican la funcionalidad mecánica y las anomalías en la arquitectura estructural de los tejidos blandos están íntimamente relacionadas con una amplia gama de patologías, incluidos tumores, aterosclerosis, envejecimiento, hígado. fibrosis o síndromes osteoarticulares, por citar algunos. Estos parámetros mecánicos de orden superior pueden convertirse en biomarcadores discriminatorios clave ya que: (1) la física de la propagación de ondas explica cómo la dispersión es una

expresión compuesta de la dispersión reológica, poroelástica y microestructural y (2) la hiperelasticidad extrema que exhiben los tejidos blandos se manifiesta claramente como generación armónica cuantificable.

ABSTRACT

Elastic changes in a tissue are associated with a broad spectrum of pathologies, which stems from the tissue microstructure, histology and biochemistry. This presentation aims to elucidate the potential of viscous and nonlinear elastic parameters as conceivable diagnostic mechanical biomarkers. First, by providing an insight into the role of soft tissue microstructure in linear elasticity; second, by understanding how viscosity and nonlinearity could enhance the current diagnosis in elastography; and finally, by compounding preliminary investigations of those elastography parameters within different technologies.

Ultrasonic elastography characterization and understanding of soft tissue is recently being developed as a clinical diagnostic tool. New elastography sensor technologies, from hardware to algorithms, are bound to endow a new class of biomarkers that quantify the mechanical functionality and abnormalities in the structural architecture of soft tissues are intimately linked to a broad range of pathologies including tumors, atherosclerosis, ageing, liver fibrosis or osteoarticular syndromes, to name a few. These higher order

* *Autor de contacto:* grus@go.ugr.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

mechanical parameters may become key discriminating biomarkers since: (1) the physics of wave propagation is explaining how dispersion is a compound expression of the rheological, poroelastic, and microstructural scattering and (2) the extreme hyperelasticity that soft tissue exhibits clearly manifests as quantifiable harmonic generation.

Palabras Clave— Ultrasonidos. Elastografía. Mecánica tisular.

1. INTRODUCTION

Ultrasonic elastography characterization and understanding of soft tissue has been developed as a clinical diagnostic tool over the last two decades and evolved through different technologies: quasi-static, dynamic elastography, based acoustic radiation force: ARFI, vibroacoustography or pSWE, or on direct excitation: sonoelastography and the emerging torsional wave principle. New elastography sensor technologies to characterize soft tissue biomechanics, from hardware to algorithms, are bound to endow a new class of biomarkers that quantify the mechanical functionality and abnormalities in the structural architecture of soft tissues are intimately linked to a broad range of pathologies including tumors, atherosclerosis, brain ageing, gestational disorders, liver fibrosis or osteoarticular syndromes, to name a few. These higher order mechanical parameters may become key discriminating biomarkers since: (1) the physics of wave propagation is explaining how dispersion is a compound expression of the rheological, poroelastic, and microstructural scattering phenomena governed by the complex fibrous multiscale microarchitecture of the stroma, which undergoes characteristic changes during pathologies; and (2) the extreme hyperelasticity that soft tissue exhibits clearly manifests as quantifiable harmonic generation, hypothesized to strongly depend on the unfolding of its collagen fibres, which again controls the tissue's mechanical functionality.

2. RECENT ADVANCES

Existing ultrasonic techniques are restricted to map first order tissue stiffness. In contrast, recent advances covering:

- a) new mechanical wave-based sensing technologies ranging magnetic resonance elastography, ultrasonic shear wave elastography or torsional wave elastography,
- b) wave propagation models and multiscale interaction with microarchitectural changes, and

c) patient testing, are allowing to quantify the mechanical functionality through relevant parameters beyond linear: dispersive and nonlinear.

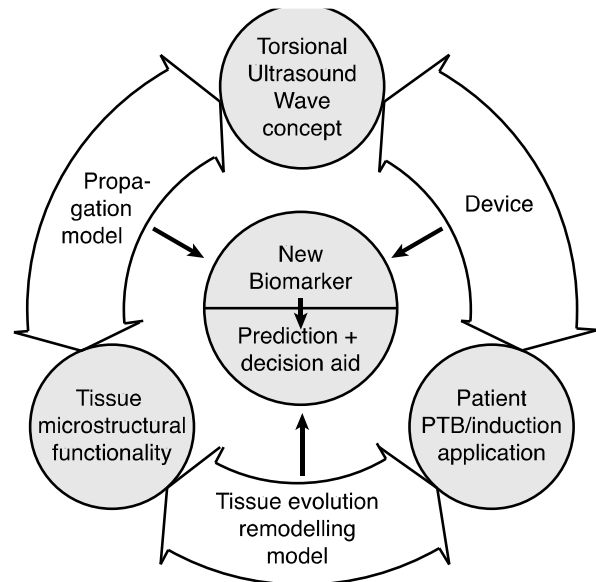


Figure 1. Dimensions of the problems to be addressed to generate a solid scientific background.

3. FUTURE DIRECTIONS

- a) To understand how structural architecture of soft tissue is intimately linked and controls a broad range of pathologies, which underpins the foundation of a new diagnostic technology.
- b) To develop new sensor technologies capable of effectively sensing tissue elasticity, and yield simple and robust diagnostic tests and instruments.
- c) To ground a new generation of biomarkers of physical nature based on the mechanical micro- architecture and properties of the tissue.

4. CONCLUSIONS

In conclusion, evidence of the diagnostic capability of elastic parameters beyond linear stiffness is gaining momentum as a result of the technological and imaging developments in the field of biomechanics. The unexplored nature and applicability span of viscous and nonlinear mechanical biomarkers endow a foundational diagnostic technology.



REFERENCES

- [1] Rus G., et al. 2020. Sensors, 20, 2379
- [2] Barr R. G., et al. 2012. Ultrasound Quarterly 28 13-20.
- [3] Melchor J and Rus G. Ultrasonics, 54(2014): 1950-1962.
- [4] Peralta L., et al. 2015. J. of Biomechanics 48 1557-1565.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Spanish Ministry of Education grant numbers PID2020-115372RB-I00, EQC2018-004508-P, DPI2017-83859-R, and UNGR15-CE-3664; and Junta de Andalucía grant numbers and B-TEP-026-UGR18, IE2017-5537, P18-RT-1653.

ELASTOGRAFÍA TRANSURETRAL POR ONDAS DE CIZALLA: UN NUEVO CONCEPTO PARA IMAGEN MÉDICA EN PRÓSTATA

Antonio Gomez^{1,2*}, León Zurfluh¹, Antonio Callejas¹, Manuel Hurtado¹,
Jorge Torres¹, Guillermo Rus¹, Nader Saffari²

¹ Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Universidad de Granada, España

² Departamento de Ingeniería Mecánica, University College London, Reino Unido

RESUMEN

El cáncer de próstata es uno de los cánceres más comunes en hombres en todo el mundo. La mayoría de los tumores prostáticos son más rígidos que el tejido normal adyacente, lo que, en principio, permite el uso de elastografía para identificar el lugar del tumor. La ablación térmica con ultrasonidos focalizados de alta intensidad está ganando relevancia para tratar el cáncer de próstata localizado. Evaluar la lesión es importante para evitar dañar el tejido sano circundante. El tejido tratado es más rígido que el tejido no tratado circundante. Esto proporciona el principio básico para también utilizar la elastografía para visualizar la lesión. Se propone un nuevo concepto de elastografía transuretral por ondas de cizalla (TUSWE) basado en la transmisión de ondas s y la detección de sus reflexiones a través de la pared uretral, para la imagen médica de la próstata. La oscilación rotativa de un emisor en contacto con la pared uretral crea un patrón pseudoesférico de ondas s que interactúa con el tejido. Las reflexiones generadas por la variación de las propiedades viscoelásticas alteradas del tejido son usadas para reconstruir el problema inverso. Resultados preliminares in silico y experimentos con fantasmas respaldan la viabilidad de TUSWE.

ABSTRACT

Prostate cancer is one of the most common cancers in men worldwide. Most prostatic tumours are stiffer than adjacent normal tissue, which enables elastography to identify the site of a prostatic tumour. High Intensity Focused Ultrasound ablation is gaining relevance for treating localised cancer in the prostate. Evaluating the lesion is important to avoid damage to surrounding healthy tissue. The ablated tissue possesses greater stiffness than the surrounding non-ablated tissue. This provides the basic principle for using elastography to image the extent of the lesion. TUSWE, a new transurethral elastography concept based on the transmission of shear waves and the detection of their echoes

through the urethral wall is proposed for imaging the prostate. The rotational oscillation of an emitter in contact with the luminal wall creates a pseudo-spherical pattern of shear waves that interacts with the tissue architecture. Imaging is based on the reception at the urethral wall of shear wave echoes generated by shear impedance variation due to altered viscoelastic properties of the tissue, such as those originated by prostatic tumours or thermally ablated regions in the prostate. Preliminary in-silico results and experiments with phantoms support further investigation of the feasibility of TUSWE.

Palabras Clave — elastografía, viscoelasticidad, próstata, problema inverso.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las técnicas de imagen por elastografía se realizan desde las superficies externas del cuerpo. Sin embargo, existen casos en los que el órgano a medir es mejor accesible desde un lumen [1]. Se propone un nuevo procedimiento de elastografía transluminal basado en la transmisión de ondas de cizallamiento y la detección de sus ecos a través de la pared luminal [2]. La oscilación rotativa de un disco en contacto con la pared luminal crea un patrón pseudoesférico de ondas de cizallamiento que interactúa con la arquitectura del tejido (Figura 1).

La primera aplicación explorada ha sido la detección del cáncer de próstata y la evaluación de la ablación térmica focal de dichos tumores a través de la uretra [3]. En este caso, la técnica ha recibido el nombre de Elastografía Transuretral por Ondas de Cizalla (TUSWE, en inglés) (ver Figura 2). El cáncer de próstata es el segundo cáncer más común en hombres en todo el mundo y la quinta causa principal de muerte por cáncer en hombres [4]. La efectividad del diagnóstico del cáncer de próstata sigue siendo baja. La mayoría de los tumores prostáticos son más rígidos que el tejido normal adyacente, lo que sugiere un potencial para que la elastografía identifique el sitio de un tumor prostático [5]. La ablación con Ultrasonido Focalizado de Alta Intensidad

* **Autor de contacto:** ajgomez@ugr.es

Copyright: ©2023 Gomez et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

(HIFU) está ganando relevancia para tratar el cáncer localizado en la próstata. Detectar la lesión inducida y monitorear su tamaño son importantes para evitar dañar el tejido sano circundante. El tejido ablacionado tiene una mayor rigidez que el tejido no ablacionado [6]. Esto permite en principio usar la elastografía para visualizar la extensión de la lesión. La imagen en TUSWE se basa en la recepción en la pared uretral de reflexiones de ondas generadas por cambios en las propiedades viscoelásticas del tejido. Las características de la lesión de utilidad clínica son: la ubicación, el tamaño y la relación de contraste de las propiedades viscoelásticas de la lesión. Resolver el problema inverso puede reconstruir esta información.

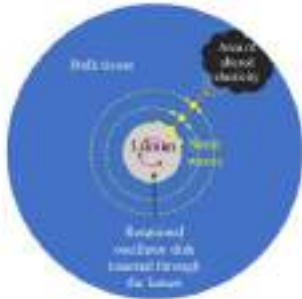


Figura 1. Idealización conceptual del principio de funcionamiento de la elastografía transluminal. Vista transversal.

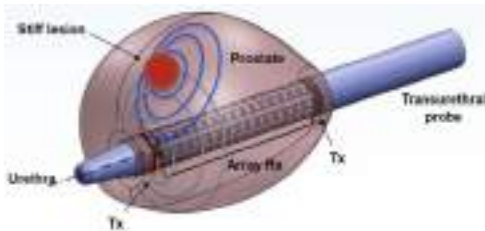


Figura 2. Idealización conceptual del principio de funcionamiento de TUSWE (Tx: emisor; Rx: receptor).

Los pasos preliminares del desarrollo de TUSWE y el estudio de su viabilidad requieren, (1) investigar las características clave de la propagación de ondas, (2) proponer métodos para resolver el problema inverso y (3) prototipar el dispositivo médico. El trabajo presentado se ha dedicado a abordar los primeros pasos para avanzar en las tres ramas diferentes que comprenden la técnica TUSWE, desarrollando así (1) un modelo directo para la propagación de ondas de cizalla en la próstata; (2) dos enfoques de reconstrucción para resolver el problema inverso y (3) un prototipo de los sensores para la futura sonda TUSWE.

2. METODOLOGÍA

La propagación de ondas de cizalla depende de las propiedades mecánicas del tejido. Los tejidos blandos pueden

ser modelados como medios viscoelásticos. En este trabajo se eligió una versión generalizada de la clásica ley de Kelvin Voigt, la ley constitutiva de Derivada Fraccional de Kelvin Voigt (KVFD), para modelar la propagación de ondas de cizalla generada en TUSWE. En la ley constitutiva KVFD, la tensión σ depende de la derivada fraccional de la deformación ϵ :

—

μ es el módulo de cizalla a frecuencia cero, η_s es el parámetro de viscosidad de cizalla KVFD y α el grado de la derivada fraccional. Se utilizó un método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD en inglés). Se modeló un medio similar a la próstata de forma simplificada como un cilindro sólido que contenía un conducto coaxial recto similar a una uretra. La validación del modelo de propagación de ondas se llevó a cabo comparando observaciones de una cámara de alta velocidad y pruebas reológicas en fantasmas de gelatina con simulaciones del modelo [8].

Dos métodos de reconstrucción para reconstruir los parámetros de las lesiones rígidas fueron propuestos [3]: Reverse Time Migration (RTM, en inglés) y un Algoritmo Genético (GA, en inglés). RTM predice los bordes de los reflectores correlacionando la propagación hacia delante del emisor y la revertida en el tiempo de los receptores. El método basado en GA busca los parámetros que minimizan la diferencia entre las señales simuladas y experimentales dentro del hiperespacio formado por los parámetros definitorios de la lesión.

Impulsados por los resultados previos logrados por un dispositivo de elastografía torsional transvaginal [9], se diseñaron los elementos de detección de la sonda TUSWE basándose en la extensión de aquellos en la sonda transvaginal. Esto es, un emisor de disco accionado electromecánicamente para transmitir un patrón de ondas de cizalla de forma axisimétrica y una matriz de receptores piezoeléctricos de cizalla para detectar las reflexiones generadas después de la propagación.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Se compararon observaciones de una cámara de alta velocidad y pruebas reológicas en fantasmas de gelatina con partículas de basalto visibles con simulaciones generadas por el modelo de propagación de ondas para TUSWE. La Figura 3 muestra un ejemplo de representación tiempo-espacio del desplazamiento de partículas debido a la propagación de ondas de cizalla en un plano dentro del fantoma de gelatina. En general, tanto las observaciones experimentales como las simulaciones del modelo fueron significativamente similares.

Se utilizó un escenario clínico in silico, con un tumor y una primera lesión HIFU, para probar los métodos de reconstrucción. Los parámetros de la lesión HIFU a reconstruir fueron r_{lesion} y ϵ_{lesion} , que son las coordenadas del

centro de la lesión, y μ_{ratio} y η_{ratio} , los ratios de rigidez y viscosidad de KVFD entre tejido normal y tejido ablacionado. La Figura 4 muestra un ejemplo de la reconstrucción mediante RTM utilizando una configuración de 3 emisores y 32 receptores. La Tabla 1 muestra los resultados de los parámetros mecánicos reconstruidos de la lesión por HIFU utilizando el método de reconstrucción basado en GA.

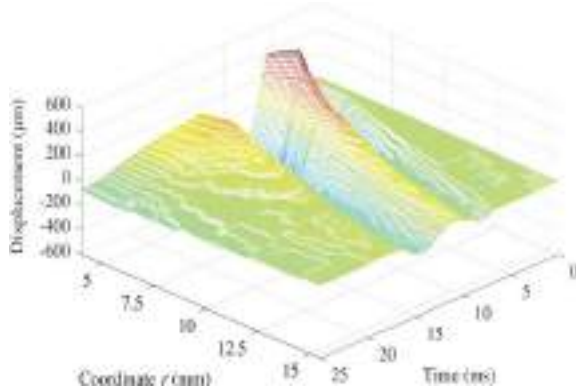


Figura 3. Representación espaciotemporal del desplazamiento de partículas debido a la propagación de ondas de cizalla.

Tabla 1. Valores reconstruidos de los cuatro parámetros de la lesión utilizando el método de GA en combinación con los resultados de RTM. Resultados en términos de media y desviación estándar.

	Real value	Reconstructed	
	14.0 mm	14.01 ± 0.04 mm	
	14.0 mm	14.03 ± 0.07 mm	
	5.0	5.09 ± 0.13 mm	
	3.0	2.94 ± 0.72 mm	

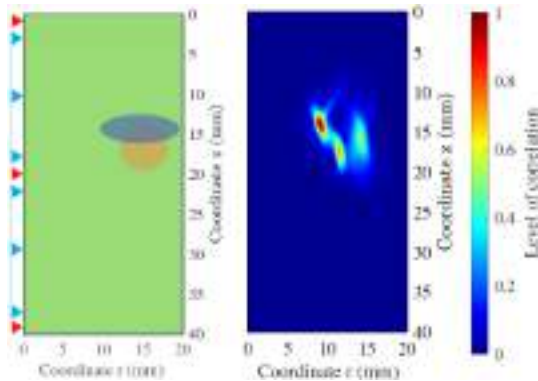


Figura 4. Ejemplo de reconstrucción mediante RTM utilizando tres emisores (triángulos rojos) y 32 receptores (triángulos azules).

La combinación de ambos métodos de reconstrucción proporciona resultados con un bajo nivel de error. La Figura 5 muestra las lecturas del primer conjunto de receptores piezoeléctricos probados en un fantoma que contiene una inclusión rígida, comparadas con el desplazamiento reconstruido a partir de imágenes de ultrasonido por un sistema Verasonics 128 Vantage (Verasonics, Redmond, WA, EE. UU.) [10].

Este estudio preliminar de viabilidad demuestra el potencial de la aproximación transluminal para la imagen del cáncer de próstata. Existe un respaldo razonable para continuar con el desarrollo hacia una etapa de prueba de concepto clínica.

4. AGRADECIMIENTOS

El primer autor es Marie Skłodowska Curie Actions Postdoctoral Fellow (IMPROVE 101062897). También se proporcionó apoyo financiero menor por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de PID2020-115372RB-I00 y PDC2021-120945-I00, y por la Junta de Andalucía, a través de B-TEP-026-UGR18 y P18-RT-1653, así como por la Universidad de Granada a través de PPJIA2022-22.

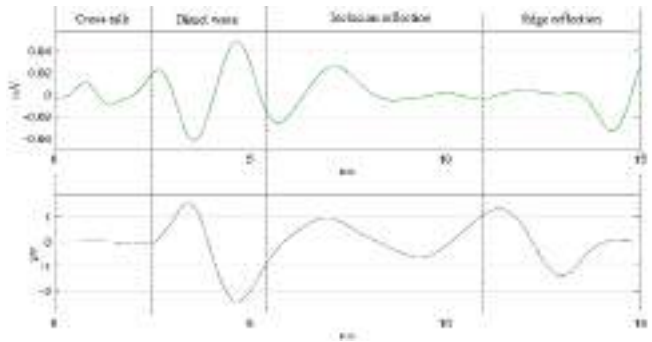


Figure 5. Lecturas (en verde) del receptor TUSWE y la imagen de ultrasonido (en negro).

5. REFERENCES

- [1] Cosgrove D. et al. *Ultraschall Der Med* 34:238-253, 2013.
- [2] Gomez A. et al., *Sensors* 21:2778, 2021.
- [3] Gomez A., PhD thesis University College London, 2018.
- [4] Freddie B. et al. *Ca-Cancer J Clin*, 68:394-424, 2018.
- [5] Correias J. et al. *Radiology*, 275:280-289, 2015.
- [6] Arnal B. et al. *IEEE TUFFC*, 58:369-378, 2011.
- [7] Saffari N. et al. Patent: PCT/ES2018/070243, 2018.
- [8] Gomez A. et al. *Scientific Reports*, 12:7448, 2022.
- [9] Callejas A. et al. *Sensors*, 17:2018, 2017.
- [10] Gomez A. et al. *Diagnostics*, 11:645, 2021.

ASSESSMENT OF PLEURA SLIDING IN LUNG ECHOGRAPHY BY SPECKLE TRACKING

Mario Muñoz Prieto^{1,2*}
Guillermo Cosarinsky^{1,2}
Jorge Fernández Cruza¹
Jorge Camacho¹

¹Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Madrid, España

²Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid, España

RESUMEN

El speckle tracking es una técnica que típicamente se utiliza para estimar el movimiento de los tejidos en ecografía cardiovascular y evaluar de forma objetiva y cuantitativa la función del miocardio. En cambio, la aplicación de esta técnica en ecografía pulmonar ha sido limitada.

En este estudio, se explora el potencial uso de speckle tracking para ecografía pulmonar y sus posibles implicaciones diagnósticas.

ABSTRACT

Speckle tracking is a technique typically used to estimate tissue motion in cardiovascular ultrasound and objectively and quantitatively to evaluate myocardial function. In contrast, the application of this technique in lung ultrasound has been limited.

In this study, we explore the potential use of speckle tracking for lung ultrasound and its possible diagnostic implications.

Palabras Clave— Speckle tracking, flujo óptico, ecografía pulmonar, pleura.

1. INTRODUCCIÓN

La ecografía pulmonar es una técnica de diagnóstico que ha ganado un protagonismo creciente en la medicina en los últimos años. Si bien la ecografía se ha utilizado históricamente para evaluar otras regiones del organismo, su aplicación en la evaluación pulmonar ha abierto nuevas puertas en la detección y el monitoreo de afecciones respiratorias. Esta técnica no invasiva permite obtener imágenes en tiempo real de los pulmones, lo que la diferencia

de otras técnicas de diagnóstico más tradicionales, como la radiografía y la tomografía computarizada [1, 2].

En este contexto, el deslizamiento pleural, que se refiere al movimiento relativo entre las capas de la pleura durante la respiración, emerge como un fenómeno de gran importancia clínica. Su estudio ofrece una ventana única para comprender la función pulmonar y puede aportar una riqueza de información para médicos y especialistas [3]. A pesar de su relevancia clínica, su cuantificación precisa supone un desafío.

Una de las técnicas clave para poder abordar este problema en la imagen de ultrasonidos es el seguimiento de speckle o “speckle tracking”. Esta técnica se basa en el análisis de patrones granulares en las imágenes de ultrasonido, conocidos como “speckle”, que resultan de los ecos interferidos de las ondas ultrasónicas con los distintos tejidos del organismo [4]. Esta técnica se viene usando en los últimos años con éxito en la ecografía cardíaca para rastrear la deformación miocárdica y evaluar la función cardíaca [5], pero su aplicación en la cuantificación del deslizamiento pleural representa una nueva oportunidad para mejorar el diagnóstico.

En este trabajo se explora el potencial del uso de algoritmos de speckle tracking, en particular con el cálculo del flujo óptico de Lucas-Kanade [6], para la cuantificación del deslizamiento pleural y la validación de la técnica en pacientes sanos y con patologías pulmonares.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Deslizamiento pleural

El deslizamiento pleural es fundamental para la mecánica respiratoria normal. Este fenómeno refleja la capacidad de los

* **Autor de contacto:** mario.munoz.prieto@csic.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

pulmones para expandirse y contraerse durante la inhalación y la exhalación [3]. La medición precisa del deslizamiento pleural puede ayudar a los médicos a evaluar la salud pulmonar de un paciente, identificar obstrucciones o irregularidades y monitorizar la progresión de enfermedades respiratorias. Además, puede ser una herramienta útil en la detección temprana de afecciones pulmonares, incluyendo enfermedades como el síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA), neumotórax o la fibrosis pulmonar [7, 8, 9].

2.2. Algoritmo de flujo óptico de Lucas-Kanade

El flujo óptico se basa en el concepto de que los píxeles en una imagen se desplazan en el tiempo y, por lo tanto, cambian de posición entre dos imágenes consecutivas. El objetivo final de esta técnica se centra en estimar cuánto se han desplazado cada pixel [10].

El algoritmo de Lucas-Kanade [6] es una implementación específica del flujo óptico en el cual se asumen dos principios:

- La intensidad de los píxeles de un objeto no varía en frames consecutivos
- Los píxeles vecinos presentarán un movimiento similar

Teniendo en cuenta tales asunciones, se seleccionan los puntos a seguir y se buscan dentro de una ventana alrededor del punto en la imagen siguiente la mejor coincidencia usando el método de mínimos cuadrados para minimizar el error y resolver las ecuaciones obteniendo los distintos vectores de movimiento [11].

3. MÉTODO

En este estudio, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizando el lenguaje de programación Python y bibliotecas especializadas como PyQt5 [12]. Esta interfaz gráfica permite a los usuarios cargar secuencias de imágenes de ultrasonido pulmonar y aplicar el algoritmo de flujo óptico para el seguimiento de puntos característicos. La GUI proporciona una forma interactiva y amigable para analizar el movimiento y evaluar el deslizamiento pleural en las imágenes.



Figura 1. Interfaz gráfica desarrollada para realizar el estudio

3.1. Función de Calibración para conversión de píxeles a milímetros

Para cuantificar el movimiento y proporcionar resultados en unidades físicas significativas, se implementó una función de calibración en la interfaz. Esta función permite la conversión de unidades de píxeles en las imágenes a unidades de milímetros en el mundo real. La calibración se realiza mediante la selección de los puntos extremos de los ejes que aparecen típicamente en las imágenes de los equipos de ultrasonido y de esta forma relacionar los valores de desplazamiento en píxeles con distancias en milímetros conocidas facilitando la interpretación clínica de los resultados.

3.2. Selección de la Región de interés (ROI)

La interfaz permite seleccionar una Región de Interés (ROI) de manera interactiva. Los usuarios pueden delinear dos distintas regiones específicas en la imagen donde desean realizar un seguimiento de movimiento:

Por un lado, se seleccionará una ROI principal, la cual englobará la sección de imagen específica en la que se quiere realizar el estudio. En esta primera ROI se implementa un algoritmo basado en flujo óptico para contrarrestar el movimiento de la sonda y de la pared torácica para garantizar que la cuantificación del desplazamiento pleural sea lo más exacta posible. Este paso es necesario porque, de no hacerlo el movimiento relativo de la pleura estaría acoplado al movimiento de la sonda y/o de la pared torácica, falseando la medida.

Por otro lado, tal y como se puede ver en la figura 1 se seleccionará la región donde se quiera cuantificar el movimiento. Esta funcionalidad permite una mayor flexibilidad al centrarse en áreas de interés específicas en las imágenes de ultrasonido pulmonar.

3.3. Análisis y cuantificación del movimiento

Una vez que se ha seleccionado la ROI y se ha aplicado la calibración, se puede iniciar el proceso de análisis de movimiento. El algoritmo de Lucas-Kanade se ejecuta en la ROI para rastrear el movimiento de los puntos característicos. Los resultados se presentan gráficamente, mostrando cómo cambian las posiciones de los puntos en el tiempo, tal y como se puede observar en la figura 2 y figura 3.

4. RESULTADOS

Se utilizaron 5 videos de pacientes sanos y 10 videos de pacientes con patología pulmonar para evaluar el funcionamiento del software y su capacidad para cuantificar el desplazamiento de la pleura.

4.1. Cuantificación del desplazamiento pleural en pacientes no sanos

En pacientes con condiciones pulmonares no sanas cuyas imágenes de ultrasonido presentan diferentes artefactos por debajo de la pleura, el algoritmo de flujo óptico demostró ser efectivo. Estos artefactos proporcionaron puntos característicos claramente identificables que pudieron ser rastreados con facilidad a lo largo de la secuencia de imágenes. Como resultado, fue posible cuantificar con precisión el desplazamiento de la pleura en pulmones no sanos. Esta capacidad de seguimiento permite un análisis cuantitativo del movimiento pleural, lo que podría tener aplicaciones significativas en el diagnóstico y seguimiento de enfermedades pulmonares.

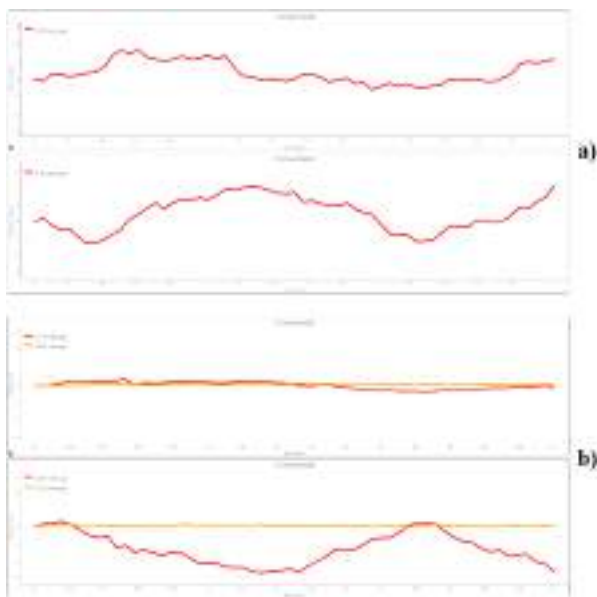


Figura 2. Grafica de movimiento en ejes X e Y dentro de la ROI a lo largo del video en dos pacientes ejemplo no sanos.

En la figura 2 a) la medición corresponde a la región inferior a la pleura. En la figura 2 b) se observa la comparación de los resultados de la medición de movimiento por encima de la pleura (naranja) con respecto al movimiento detectado por debajo de la pleura (rojo).

4.2. Cuantificación del desplazamiento pleural en pacientes sanos

Sin embargo, se observaron desafíos en la cuantificación del desplazamiento pleural en pacientes sanos. En ausencia de artefactos o condiciones patológicas que generaran puntos característicos en las imágenes, el speckle que aparece bajo tejido pleural sano presentaba un movimiento aleatorio y sin un patrón discernible. Esto dificultó la aplicación efectiva del algoritmo de flujo óptico en este grupo de pacientes como se puede apreciar en la figura 3: en a) únicamente se detecta movimiento al final del video impidiendo una métrica exacta. En b), el movimiento detectado presenta un patrón aleatorio debido a la variación aleatoria del speckle.

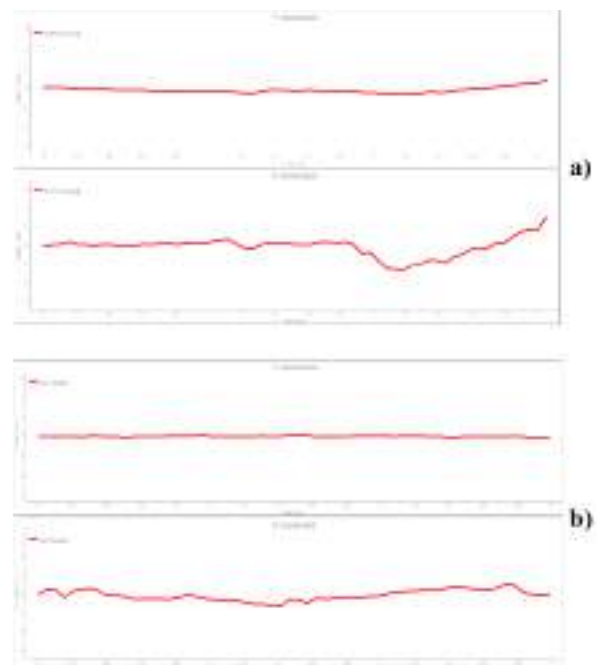


Figura 3. Grafica de movimiento en ejes X e Y dentro de la ROI a lo largo del video en dos pacientes ejemplo sanos.

5. DISCUSIÓN

En todos los pacientes con patología pulmonar fue posible seguir y cuantificar el deslizamiento pleural. Sin embargo, en ausencia de artefactos causados por síndromes intersticiales, el seguimiento no fue correcto.

Una opción a explorar es la aplicación de técnicas de mejora de imágenes y de procesamiento previo, para mejorar

el rendimiento del algoritmo en pacientes sin patologías intersticiales.

Si bien en este estudio se utilizó una única sonda, sería interesante analizar la influencia de diferentes condiciones de adquisición, como la resolución y la calidad de las imágenes, en la capacidad de los algoritmos de speckle tracking para rastrear el movimiento pleural. En particular, utilizar una frecuencia mayor, podría ser de utilidad para intentar detectar el movimiento en pacientes sanos, justo debajo de la línea pleural.

Otro aspecto importante se refiere a la interpretación clínica de las mediciones de desplazamiento pleural y cómo estas métricas pueden correlacionarse con la gravedad de las enfermedades pulmonares. Además, es fundamental explorar la viabilidad de su implementación clínica, incluida la capacitación de profesionales de la salud en su uso.

6. CONCLUSIONES

La interfaz gráfica desarrollada proporciona una herramienta interactiva y flexible para analizar el flujo óptico en las imágenes de ultrasonido pulmonar. La capacidad de seleccionar una ROI específica y la función de calibración garantizan mediciones precisas y facilitan la evaluación del deslizamiento pleural en términos clínicos significativos, lo que puede ser de gran utilidad en el diagnóstico y seguimiento de condiciones pulmonares.

Este estudio destaca la utilidad de algoritmos de speckle tracking como una herramienta valiosa para la cuantificación del desplazamiento pleural en pacientes con indicaciones ecográficas compatibles con síndrome intersticial. Al mismo tiempo, subraya la necesidad de abordar los desafíos asociados con la aplicación de esta técnica en pacientes que no presentan este tipo de hallazgos ecográficos, y en los que no hay regiones de speckle fácilmente identificables con el movimiento pleural.

7. REFERENCIAS

[1] Vieillard-Baron A, Goffi A, Mayo P. Lung ultrasonography as an alternative to chest computed tomography in COVID-19 pneumonia? *Intensive Care Med.* 2020 Oct;46(10):1908-1910. doi: 10.1007/s00134-020-06221-0. Epub 2020 Aug 25. PMID: 32840635; PMCID: PMC7445802.

[2] Elabbas A, Choudhary R, Gullapalli D, Mistry S, MHF, Mallick AH, Kevu EP, Asif J, Mostafa JA. Lung Ultrasonography Beyond the Diagnosis of Pediatrics Pneumonia. *Cureus.* 2022 Feb 21;14(2):e22460. doi: 10.7759/cureus.22460. PMID: 35371734; PMCID: PMC8942135.

[3] Bhoil R, Ahluwalia A, Chopra R, Surya M, Bhoil S. Signs and lines in lung ultrasound. *J Ultrason.* 2021 Aug 16;21(86):e225-e233. doi: 10.15557/JoU.2021.0036. Epub 2021 Sep 9. PMID: 34540277; PMCID: PMC8439137.

[4] Ricardo G. Dantas, Eduardo T. Costa, Sidney Leeman, Ultrasound speckle and equivalent scatterers, *Ultrasonics*, Volume 43, Issue 6, 2005, Pages 405-420, ISSN 0041-624X, doi: 10.1016/j.ultras.2004.11.003.

[5] Mondillo S, Galderisi M, Mele D, Cameli M, Lomoriello VS, Zacà V, Ballo P, D'Andrea A, Muraru D, Losi M, Agricola E, D'Errico A, Buralli S, Sciomer S, Nistri S, Badano L; Echocardiography Study Group Of The Italian Society Of Cardiology (Rome, Italy). Speckle-tracking echocardiography: a new technique for assessing myocardial function. *J Ultrasound Med.* 2011 Jan;30(1):71-83. doi: 10.7863/jum.2011.30.1.71. PMID: 21193707.

[6] B.D. Lucas, T. Kanade, "An Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision", in *Proceedings of Image Understanding Workshop*, 1981, pp. 121-130.

[7] A. Lasarte Izcue, J.M. Navasa Melado, G. Blanco Rodríguez, I. Fidalgo González, J.A. Parra Blanco, Diagnóstico ecográfico del neumotórax, *Radiología*, Volume 56, Issue 3, 2014, Pages 229-234, ISSN 0033-8338, doi: 10.1016/j.rx.2012.09.003.

[8] Manolescu D, Davidescu L, Traila D, Oancea C, Tudorache V. The reliability of lung ultrasound in assessment of idiopathic pulmonary fibrosis. *Clin Interv Aging.* 2018 Mar 22;13:437-449. doi: 10.2147/CIA.S156615. PMID: 29606857; PMCID: PMC5868611.

[9] Slöcker Barrio M, Sánchez Porras M, Coca Pérez A, Muñozero M, Rodríguez P. Diagnóstico por ecografía de la insuficiencia respiratoria aguda en Pediatría. *Protoc diagn ter pediatr.* 2021;1:417-36.

[10] Optical flow measurement using Lucas-Kanade method, Dhara Patel, Saurabh Upadhyay, *International Journal of Computer Applications* (0975-887), vol. 61, January 2013.

[11] Bruce D. Lucas "Image Matching by the Method of Differences", Carnegie Mellon University, year 1984.

[12] <https://doc.qt.io/qtforpython-5/>

SKIN CANCER DIAGNOSIS USING TORSIONAL WAVE ELASTOGRAPHY: A NEW APPROACH

Hirad Shamimi Noori^{1,2*}
Inas H Faris^{1,2}
Jose Luis Martin Rodriguez³
Guillermo Rus^{1,2,4}

¹Universidad de Granada, Granada, Spain

²Instituto de investigación Biosanitaria, Ibs. Granada, Granada Spain

³Hospital Universitario Clínico San Cecilio, Granada, Spain

⁴Excellence Research Unit, MNat, Granada, Spain

ABSTRACT

A new technique based on propagation of shear elastic waves into the skin tissue, called Torsional Wave Elastography (TWE) for diagnosis of skin cancer and characterization of skin mechanical properties is presented. Non-invasive diagnostic methods are desirable to avoid invasive procedures and potential complications. The technique evaluates three biomarkers: elasticity, viscosity, and anisotropy. A TWE device able to generate shear elastic waves at 0.4-1 kHz was developed providing information about the mechanical properties of the tissue. TWE tests were conducted on patients and the results were evaluated by considering Histopathology as the gold standard.

Palabras Clave— skin cancer, Torsional wave elastography, non-invasive diagnosis, shear wave elastography

1. INTRODUCTION

Skin cancer, characterized by the abnormal growth of skin cells, is one of the top 20 most common cancers globally, categorized into two main types: melanoma and non-melanoma cancers. In recent years, there has been a noticeable rise in the occurrence of various skin cancer types globally, with nearly 200,000 cases of melanoma and more than 3 million non-melanoma cancers reported in the United States alone in 2022 [1].

The diagnosis of skin cancer primarily relies on conventional methods, which are inherently seen as invasive diagnostic methods. These methods are primarily based on visual

inspection of the lesion by the dermatologist and regional biopsy to characterize the type of pathology that occurred on skin. Furthermore, skin is regarded as one of the body's organs for which its mechanical characteristics have not been completely understood. To this end, several techniques, such as Optical Coherence Elastography (OCE), transient elastography methods (HF-TE), Sono elastography, Shear wave Elastography, and Indentation, have been explored to uncover the biomechanical properties of the skin. A shared element among all these methods is the assumption that there are alterations in the stiffness of the tumor when compared to the surrounding tissue.

In OCE, the assessment of skin tissue stiffness involves measuring the surface wave created through an external excitation method and monitoring the propagated wave using an OCT beam [2]. On the other hand, in HF-TE, an externally generated mechanical wave is tracked using a high-frequency ultrasonic probe [3]. In Shear wave elastography, the tissue is exposed to acoustic radiation force, and its displacement is studied using the same transducer. While all these methods are categorized as quantitative elastography techniques with the capacity to characterize the mechanical properties of soft tissue, there are limitations in their clinical application. Most of these methods rely on an external wave source and track the propagated wave into the tissue using commercially available devices. Furthermore, only a small number of studies have involved participants with suspicious skin lesions. When using shear wave-based techniques, characterizing the mechanical properties of the skin, which comprises three different layers with a total thickness of less than 5 millimeters, is challenging and often not feasible due to the requirement for a high-frequency device with high

* **Autor de contacto:** hiradshamimi@correo.ugr.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

resolution to track the wave in the desired layer. Another drawback in techniques based on the propagation of shear waves is the challenge of effectively separating longitudinal waves from shear waves when tracking them within the tissue [4].

To mitigate the limitations associated with evaluating the mechanical properties of skin, a new technique based on propagation of torsional waves is proposed. Torsional waves are shear elastic waves propagating radially into the soft tissue and in a curled geometry in depth [4]. This technique will evaluate the mechanical properties of soft tissue by considering (1) elasticity, (2) viscosity, (3) anisotropy and (4) non-linearity. The focus of this paper is on the extraction of the elasticity of the pathological tissue and comparison of the acquired results with the result of the histopathology tests for validation of robustness of torsional wave elastography in diagnosis of skin cancer.

2. TORSIONAL WAVE ELASTOGRAPHY

Torsional wave elastography (TWE) is a new dynamic elastography technique based on propagation of shear elastic waves into the soft tissue and extraction of the elasticity of the tissue. In this technique, the challenges associated with the attenuation of the emitted shear wave within the medium are mitigated due to the radial propagation behavior of the torsional wave in soft tissue [5]. This advantage over shear waves facilitates the development of a novel non-invasive diagnostic technique. Furthermore, TWE possesses the capability to assess the biomechanical characteristics of soft tissue through the emission of low-frequency shear elastic waves spanning from 50 Hz to 2 kHz.

3. PERFORMANCE ANALYSIS OF TWE

3.1. Device

A new TWE device based on the previous concept of torsional wave elastography device for evaluation of cervical elasticity [6] was designed and fabricated for diagnosis of skin diseases such as Basal Cell Carcinoma (BCC), Squamous Cell Carcinoma (SCC) and Melanoma. The device is composed of an emitter able to generate shear elastic waves at 50 Hz to 2kHz and a receiver to sense the propagated wave into the tissue.

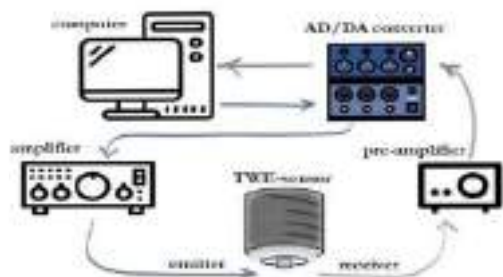


Figure 1. TWE device components

3.2. Validation

To establish the validity of the new device, two sets of hydrogel phantoms with different concentrations of gelatin 10 % and 15% were fabricated and tested using a torsional wave emitter which propagated the wave in burst as 1-cycle sinusoidal frequency of 1kHz and amplitude of 500mV [7], and Verasonics research system L22-14vX transducer with center frequency of 18 MHz as the receiver. The acquired shear wave speed from both phantoms were recorded to compare the results with the tests done on the same phantoms using the TWE device (table1).

Table 1. Comparison of the shear wave velocity acquired using Verasonics research system and the TWE device.

Ultrafast Imaging (m/s)	TWE (m/s)
3.831±0.225	3.931±0.325
4.395±0.089	4.379±0.343

4. IN-VIVO EXPERIMENTS

4.1. Participants

Patients with skin lesions suspicious of any type of cancer were primarily diagnosed by the dermatologists at the Hospital Universitario clinico San cecilio, Spain. After the preliminary diagnosis, patients were referred to the radiology department for the pre-surgical TWE test.

Participants were enrolled for TWE test after meeting the eligibility criteria. Patients with the following conditions were excluded from the tests.

- Pregnancy in females.
- Presence of pathological tissue associated with open wound.
- Medical history of cutaneous, rheumatoid, immunological, or metabolic diseases.
- Prior history of radiation therapy or chemotherapy.
- Previous excision of the lesion with subsequent recurrence.
- Refusal to participate in the tests.

4.2. Testing procedure

TWE tests were conducted after obtaining informed consent from the participants and receiving ethical approval. The skin is regarded as significantly anisotropic, with a broad spectrum of Young's modulus values that vary based on the alignment of Langer's lines [8]. To evaluate the stiffness of the pathological tissue, the lesion was tested by measuring the shear wave velocity in a clockwise manner. This method of

testing enables the possibility of detecting the distribution of the cancerous cells in the tissue. Moreover, to be able to understand the changes in the stiffness of the pathological tissue, the healthy tissue in the proximity of the pathological tissue or on the symmetrical side of the body was tested by putting the hand-held probe in directions transverse and parallel to the fiber alignment.

4.3. TWE results

Obtained results from tests conducted on 1 patient in frequencies 400 Hz to 1 kHz are shown in Figure 2. The preliminary acquired results are considered as the velocity of the shear wave in the tissue vs the frequency of the generated wave. With this approach the changes in the stiffness of the tissue will be evaluated based on the changes in the frequency of the generated wave.

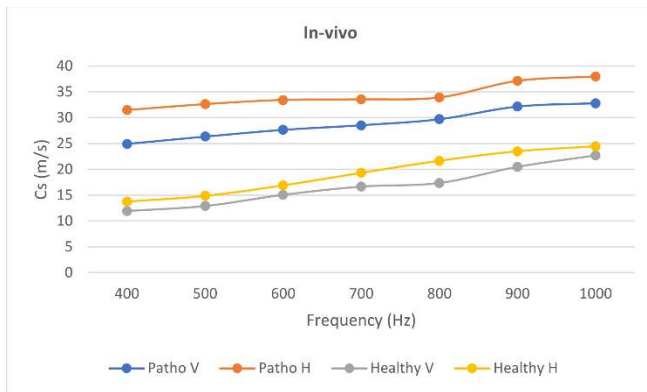


Figure 2. TWE measurement on a patient with Basal Cell Carcinoma.

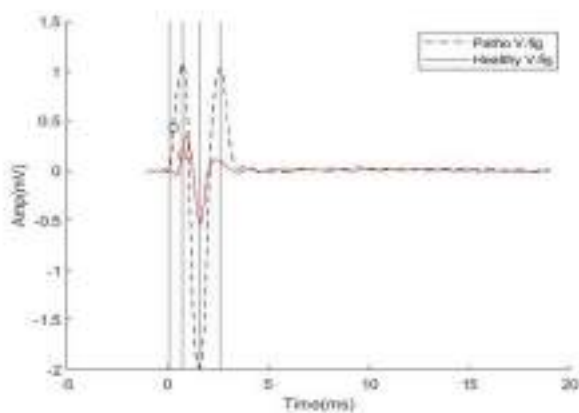


Figure 3. Signal acquired from TWE test.

4.4. Calculation of stiffness ratio

Stiffness ratio is calculated based on the velocity of the shear wave in the pathological tissue and healthy tissue to

understand the severity of the disease. (Table 2) provides as overview of the results of the TWE tests conducted on 5 participants diagnosed with different types of skin cancer. These results were evaluated by histopathology reports after the excision of the lesion.

Table 2. Shear wave velocity and stiffness ratio acquired from TWE tests.

# patient	Patho (m/s)	Healthy (m/s)	Stiffness ratio
1	25.59	4.91	5.2
2	16.40	6.21	2.6
3	9.74	4.33	2.2
4	17.94	4.31	4.2
5	27.81	19.39	1.4

5. COCLUSION

A non-invasive low frequency elastography technique based on generation of shear elastic waves was proposed and investigated for the diagnosis of skin cancer. Estimation of shear elasticity is based on measurement of the shear wave speed in the tissue allowing the extraction of the mechanical properties of pathologies. This technique was tested on patients suffering from various types of skin cancers. The shear wave velocity of the skin changed with the presence of the pathological tissue. Moreover, this technique enables the possibility of characterization of the behavior of soft tissue exposed to different frequencies in a single measurement. Correlation of the TWE results with the histopathology reports demonstrates that this method could be a useful tool for diagnosing skin pathologies. The detection of most cancers in minor organs, such as the mouth and glands, may be facilitated by comprehending the changes in the mechanical characteristics of skin tissue. Torsional wave elastography is a contemporary and user-friendly instrument that offers expanded possibilities for many applications, hence providing several benefits to individuals across diverse domains.

REFERENCES

- [1] American Academy of Dermatology, "Skin Cancer, Incidence", <https://www.aad.org/media/stats-skin-cancer>
- [2] Li. Chunhui, Guan. Guangying, Reif. Roberto, Huang. Zhihong and Wang. Ruikang K, "Determining elastic properties of skin by measuring surface waves from an impulse mechanical stimulus using phase-sensitive optical coherence tomography", *J. R. Soc. Interface.* 9831–841, 2012.
- [3] J. Gennisson, T. Baldeweck, M. Tanter, S. Catheline, M.Fink, L.Sandrin, C. Cornillon, and B. Querleux, "Assessment of Elastic Parameters of Human Skin Using Dynamic Elastography", *IEEE*

transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control,
vol. 51, no. 8, pp.980-989, 2004.

[4] Callejas, A.; Gomez, A.; Melchor, J.; Riveiro, M.; Massó, P.; Torres, J.; López-López, M.T.; Rus, G. “Performance Study of a Torsional Wave Sensor and Cervical Tissue Characterization”, *Sensors*, 17, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17092078>

[5] Ouared, A.; Montagnon, E.; Cloutier, G, “Generation of remote adaptive torsional shear waves with an octagonal phased array to enhance displacements and reduce variability of shear wave speeds: Comparison with quasi-plane shear wavefronts”, *Phys. Med. Biol.* 60, 8161–8185, 2015.

[6] Callejas, A.; Gomez, A.; Faris, I.H.; Melchor, J.; Rus, G. “Kelvin–Voigt Parameters Reconstruction of Cervical Tissue-Mimicking Phantoms Using Torsional Wave Elastography”, *Sensors*, vol. 19, 3281, 2018. <https://doi.org/10.3390/s19153281>

[7] G.Rus, M.Riveiro, F.S.Molina, “Effect of Contact Conditions of Torsional Wave Elastographic Probe on Human Cervix”. *Mathematical Problems in Engineering*, vol 2018, Article ID 6494758, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6494758>

[8] Kalra, A, Lowe, A, Al-Jumaily, AM, “Mechanical Behaviour of Skin: A Review”. *J Material Sci Eng*, vol. 5: 254, 2016. [doi:10.4172/2169-0022.1000254](https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000254)

MONITORING PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES IN LASAGNA PASTA USING CONTACTLESS ULTRASOUND

Virginia Sanchez-Jimenez^{1*}, Anabella S. Giacomozzi¹, Javier Serrano Gutierrez¹, Jorge Gosalbez Castillo², Jose Benedito Fort¹, Jose V. Garcia Perez¹

¹Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Instituto de Ingeniería de Alimentos FoodUPV - Universitat Politècnica de València, Valencia, España

²Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) - Universitat Politècnica de València, Valencia, España

ABSTRACT

In recent years, the market of ready to serve meals has experienced significant growth, leading to the development of new products and innovations. Furthermore, the concept of Industry 4.0 represents a great challenge for the food industry, requiring the development of automated and non-invasive sensors capable of accurately estimating food quality parameters. In this context, contactless ultrasound has emerged as an advanced characterization technique that enables real-time and on-line measurements.

Moisture adsorption and dehydration is widely recognized as one of the most critical factors influencing the shelf life of cereal-based products. This study aims to assess the feasibility of contactless ultrasound as an innovative and non-invasive technique for monitoring the physicochemical properties of lasagna, including moisture content, water activity, and texture, which are influenced by moisture adsorption. Lasagna samples were subjected to different relative humidities storage conditions (10 and 40 %) for 14 days at 30 °C to induce changes in their physicochemical properties. The results demonstrated the sensitivity of ultrasound in detecting the physicochemical changes associated with moisture adsorption in lasagna.

Keywords—ultrasound, contactless, lasagna, moisture desorption.

1. INTRODUCTION

Ultrasound (US) is a technique applied in many research fields; however, it is still relatively undiscovered by the food industry as a non-destructive testing (NDT) method [1]. The considerable growth of the food industry, coupled with the trend toward automating industrial processes (Industry 4.0), has led to the development of sensors for controlling and monitoring food transformation and quality parameters [2].

High-frequency ultrasound has, therefore, been introduced into the food industry as a versatile and valuable tool for characterizing and potentially predicting parameters such as density, moisture content, and textural properties [3,4]. Ultrasonic waves are strongly influenced by the physical properties of the food matrix through which they travel, leading to modifications in ultrasonic parameters such as the ultrasonic velocity or attenuation [5]. For instance, Garcia-Perez et al. [6] monitored the salting process of ham using pulse-echo US measurements (1 MHz) and correlated the salting evolution with changes in the time-of-flight (Δ TOF).

Dried pasta products, including lasagna sheets, represents examples of foods that could significantly benefit from the application of US as quality control technique. The main challenge faced by these products during production and storage is small variation on the moisture content caused by formulation or drying operations, which may cause noticeable modifications on its technological properties, such as texture [7]. Consequently, texture analysis has become a critical control point in the production line. However, instrumental texture analysis is a destructive method that generates food waste, is time-consuming, and requires trained professionals [2]. Therefore, the incorporation of smart sensors into lasagna processing lines could provide a rapid and cost-effective method for quality evaluation.

Air-coupled ultrasound presents a significant potential for in-line applications due to its contactless character in contrast to conventional ultrasound, which requires physical contact between product and sensor or the use of couplants. Contactless US, in this regard, is considered a sensor that offers numerous advantages at an industrial level, including improved product quality at a low installation cost, non-invasive analysis, and ease of use. These advantages have recently been documented in the literature. Thus, Kerhervé et al. [5] who studied the feasibility of on-line ultrasound

* **Corresponding author:** jogarpe4@tal.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

measurements for industrial quality control of noodle dough. They established correlations between ultrasonic velocity and attenuation, and moisture content and dough sheets thickness. Therefore, the aim of this study was to assess the viability of using air-coupled ultrasound as a quality evaluation technique for dried lasagna. This evaluation is based on the modification of its textural properties due to slight variations in moisture content.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Raw sample and storage conditions

Lasagna dried sheets were purchased from a local market (Valencia, Spain). The commercial lasagna had square dimensions (80×80 mm) and an averaged thickness of 1.17 mm. The samples were stored at room temperature ($22 \pm 1^\circ\text{C}$) until the analysis.

Different storage conditions were carried out in hermetic containers with controlled relative humidities (H.R.) of 10 and 40 % in order to cause slight changes on the moisture content. For this purpose, lasagna sheets were placed in closed containers with saturated salt solutions (LiCl, 10 % and K_2CO_3 , 40 %) at $30 \pm 1^\circ\text{C}$ until equilibrium was reached. The adsorption experiments were performed in triplicate using 10 lasagna sheets per test.

2.2. Contactless ultrasound measurements

Contactless ultrasound measurements were performed in through-transmission mode, as shown in Figure 1. A pair of unfocused piezoelectric transducers with a central frequency of 0.3 MHz of a peak sensitivity of -25 dB, and 20 mm diameter (ITEFI-CSIC, Spain) were used [8]. A pulser/receiver (5077 PR, Olympus, USA) was used to drive a 400 V impulse tuned at 0.3 MHz to the transmitter transducer. Afterwards, the received signal was amplified by 59 dB, and the resulting signal was digitalized (NI 6501, National Instruments, USA). The digitalization rate was 100 MS/s and 128 samples were averaged to minimize the random electrical noise.

The sample measurement was carried out using a holding plate with a hollow (25 mm diameter) where the samples were located. Five ultrasonic measurements were acquired along the lasagna sheets. Prior to the measurements, the reference signal was taken without the sample, and the sample's thickness was measured using a laser sensor (OXH7-Z050.HI06660.VI, Baumer). Temperature and H.R. were monitored during the measurements.

The ultrasonic signals were analysed using the energy threshold method [9] to obtain the time-of-flight (TOF).



Figure 1. Contactless ultrasound set-up.

Afterwards, the propagation velocity was computed using equation (1), considering ΔTOF as the difference between the TOF from the sample and the reference.

$$v = \frac{L}{\left(\frac{L}{v_0}\right) + \Delta\text{TOF}} \quad (1)$$

Where v is the ultrasonic wave velocity (m/s), L is the sample thickness (m) and v_0 is the velocity of sound in the air (343 m/s at 22°C and 1 bar).

2.3. Texture analysis

The mechanical properties of the lasagna sheets were determined through a three-point bending test using a texture analyser (TA. XT2i, Stable Micro Systems, UK). The lasagna sheets were positioned over two support points separated by a defined distance (40 mm) (HDP/3PB). A flexion deformation was applied to each sample at a test speed of 3 mm/s and a travel distance of 5 mm. Finally, the stiffness (N/mm) of the lasagna sheets was computed as the slope of the force-time profile. The analysis was performed in triplicate for each sample condition.

2.4. Moisture and water activity analysis

The moisture content (% wet basis) and water activity (a_w) of the samples were determined. The moisture content was determined using a gravimetric method, involving the drying of the samples in a convection oven (105°C) until constant weight. Water activity was measured using a dew-point hygrometer (25°C) (Waterlab, Steroglass, Italy). The analysis were carried out in triplicate for each sample condition.

2.5. Statistical analysis

The analysis of variance (ANOVA) was applied in order to determine if the mean values of the stiffness and ultrasonic velocity were significantly affected by the moisture content

of the lasagna sheets. Comparison of the means was performed using Fisher Least Significant Differences (LSD) test with 95 % confidence interval. Statistical analysis was carried out using Statgraphics Centurion XVII (Statgraphics Technologies Inc., VA, USA).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Modification of moisture and water activity

The different storage conditions (H.R., %) lead to modifications in the moisture content and a_w of the lasagna sheets once equilibrium was reached. Table 1 shows the reduction in a_w for samples stored at 10 and 40 % (0.223 and 0.470, respectively) compared to the commercial samples (0.561). Due to water activity of commercial lasagna was higher than relative humidity during storage, lasagna suffer small dehydration from 10.58 % (Commercial) to 3.29 % (10 % H.R.) of moisture content. The effect of the H. R. (%) conditions on the composition and quality properties in cereal products has been studied by numerous authors such as Guiné et al. [10] for biscuits and Lewicki and Jakubczyk [11] for bread crackers. Cereal-based products such as lasagna are hygroscopic and fragile products, which generates great interest in understanding the influence of small variations in moisture content on their textural properties.

Table 1. Moisture content, water activity (a_w) and thickness measurement.

Sample	a_w	Moisture [%, w.b.]	Thickness [mm]
Commercial	0.561±0.016	10.58±0.21	1.17±0.02
10 % H.R.	0.223±0.013	3.29±0.13	1.12±0.02
40 % H.R.	0.470±0.006	8.48±0.12	1.15±0.02

±standard deviation

3.2. Influence of moisture content on ultrasonic velocity

Figure 2 illustrates the increment of ultrasonic velocity due to the reduction of the moisture content. This relationship is further depicted in Figure 3 where the TOF of the three samples is visualized.

The increase of ultrasonic velocity in the samples with low moisture content could be attributed, among other factors, to the sample thickness reduction (Table 1). The possible densification of the samples with lowest moisture content could improve the wave transmission [12]. This phenomenon has been documented in different food matrices, such as dry-cured ham [13] or dried potato snacks [14]. Thus, these result shows the great influence of the moisture content variation to the lasagna structural and mechanical properties.

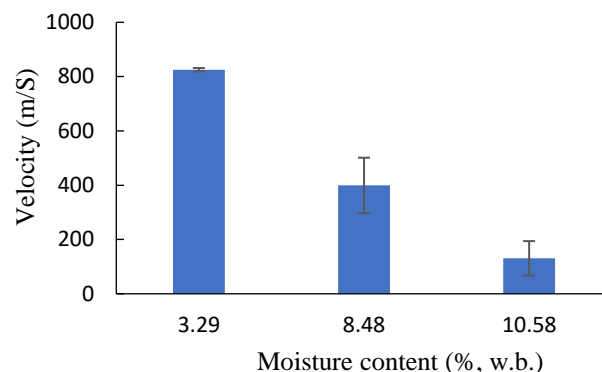


Figure 2. Ultrasonic velocity of lasagna at different moisture content. Error bars show standard deviation (SD).

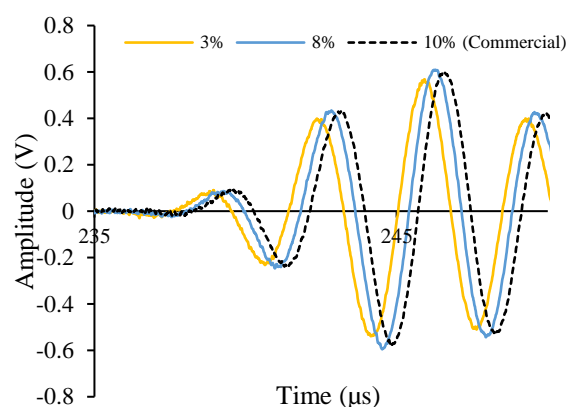


Figure 3. Ultrasonic signals in lasagna with different moisture content (% w.b.).

3.3. Influence of moisture content on textural properties

Even small changes in moisture content led to modifications in the mechanical properties of lasagna. Stiffness, or resistance to deformation, is a parameter that can be related to Young's modulus [15]. Figure 4 shows an increment in stiffness from 19.03 ± 1.48 N/mm (at 10.58 % moisture content) to 26.44 ± 1.92 N/s (at 3.29 % moisture content) according with the moisture content, due to the different H.R. of storage. If commercial and stored at 40 % H.R. samples are compared, a noticeable change of stiffness is observed despite the relatively small increase in moisture content (from 8.45 to 10.58 %). These results show the significant effect of moisture content on the textural properties of this type of product. Similar findings were observed during the drying of potato slices by Sanchez-Jimenez et al. [14], who reported an increase in the elastic modulus due to the reduction in moisture content, ranging from 4.44 (at 3.80 kg water/kg d.m) to 6.34 MPa (at 0.11 kg water/kg d.m).

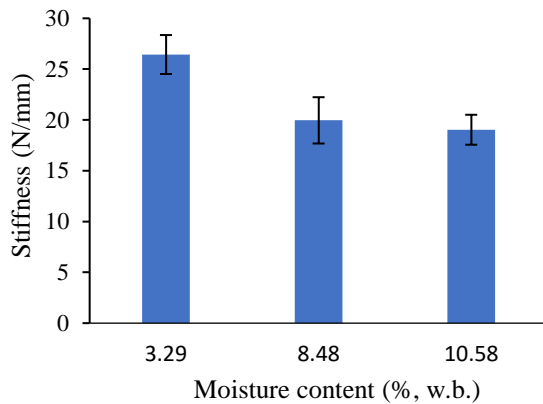


Figure 4. Stiffness of lasagna at different moisture content. Error bars show standard deviation (SD).

3.4. Relationship between ultrasonic and textural parameters

The relationship between stiffness and ultrasonic velocity is illustrated in Figure 5. It could observe a higher propagation velocity in samples with the highest stiffness (26.44 N/mm) than in the lowest stiffness samples (19.03 N/mm), with velocity values of 826 m/s and 131 m/s, respectively. In fact, Figure 5 demonstrates that even a slight increase in stiffness (from 19.03 to 26.44) leads to a significant change in ultrasonic velocity (from 130.80 to 825.60).

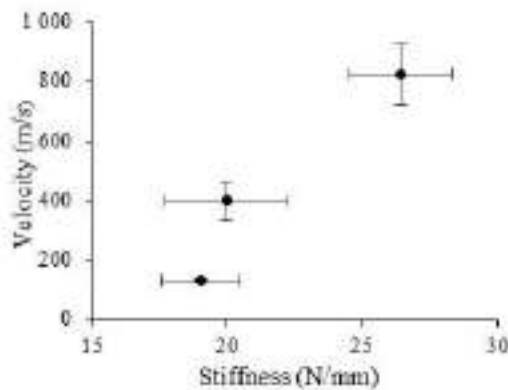


Figure 5. Relationship between ultrasonic velocity and stiffness in lasagna sheets. Error bars show standard deviation (SD).

The influence of textural properties modification on ultrasonic propagation velocity is explained by equation (2). Thus, the increase in material elastic modulus at low moisture content, leads to a faster wave propagation [1].

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

Where ρ is the density (kg/m^3) and E is the elastic modulus (E, Pa).

The results obtained are in concordance with those obtained by Sanchez-Jimenez et al. [14] and Kim et al. [16] when relating the elastic properties of potato slices and apple with ultrasonic velocity.

4. CONCLUSIONS

The feasibility of the contactless ultrasound technique for the estimation of the textural properties of dried lasagna with different moisture content was illustrated. The modification of the mechanical properties of lasagna by small changes of the moisture content was adequately described by the ultrasonic velocity. This application presents significant prospects for improving the texture analysis of this type of product at industrial level.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the financial support through the ULTRADIGITAL project (AGROALNEXT/2022/045), which is part of the AGROALNEXT programme and was supported by MCIN with funding from European Union NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) and by Generalitat Valenciana". M.D.

6. REFERENCES

- [1] Mohd Khairi, M.T.; Ibrahim, S.; Md Yunus, M.A.; Faramarzi, M. Contact and Non-Contact Ultrasonic Measurement in the Food Industry: A Review. *Meas. Sci. Technol.* 2016, 27, doi:10.1088/0957-0233/27/1/012001.
- [2] Xiaobo, Z.; Xiaowei, H.; Povey, M. Non-Invasive Sensing for Food Reassurance. *Analyst* 2016, 141, 1587–1610, doi:10.1039/c5an02152a.
- [3] Fariñas, M.D.; Sanchez-Jimenez, V.; Benedito, J.; Garcia-Perez, J. V Monitoring Physicochemical Modifications in Beef Steaks during Dry Salting Using Contact and Non-Contact Ultrasonic Techniques. 2023, 204.
- [4] Villamiel, M.; Montilla, A.; Garcia-Perez, J. V.; Carcel, J.A.; Benedito, J. *Ultrasound in Food Processing*; 2017; ISBN 9781118964187.
- [5] Salazar, J.; Chávez, J.; Turó, A.; García-Hernández, M.J. *Ultrasound in Food Processing Recent Advances*; 2017; ISBN 9781118964187.
- [6] Garcia-Perez, J. V.; de Prados, M.; Martinez, G.; Gomez Alvarez-Arenas, T.E.; Benedito, J. Ultrasonic Online Monitoring of the Ham Salting Process. *Methods for Signal Analysis: Time of Flight Calculation.* *J. Food Eng.* 2019, 263, 87–95, doi:10.1016/j.jfoodeng.2019.05.032.
- [7] Roudaut, G.; Dacremont, C.; Le Meste, M. Influence of Water on the Crispness of Cereal-Based Foods: Acoustic,

- Mechanical, and Sensory Studies. *J. Texture Stud.* 1998, 29, 199–213, doi:10.1111/j.1745-4603.1998.tb00164.x.
- [8] Álvarez-Arenas, T.E.G. Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducers to the Air. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 2004, 51, 624–633, doi:10.1109/TUFFC.2004.1320834.
- [9] de Prados, M.; Garcia-Perez, J. V.; Benedito, J. Non-Invasive Ultrasonic Technology for Continuous Monitoring of Pork Loin and Ham Dry Salting. *Meat Sci.* 2017, 128, 8–14, doi:10.1016/j.meatsci.2017.01.009.
- [10] Guiné, R.P.F.; Barroca, M.J.; Pereira, D.; Correia, P.M.R. Adsorption Isotherms of Maria Biscuits from Different Brands. *J. Food Process Eng.* 2014, 37, 329–337, doi:10.1111/jfpe.12089.
- [11] Lewicki, P.; Jakubczyk, E. Effect of Water Activity on Mechanical Properties of Dry Cereal Products. *Acta Agrophysica* 2004, 4, 381–391.
- [12] Barbosa-Cánovas, G. V.; Fontana, A.J.; Schmidt, S.J.; Labuza, T.P. *Water Activity in Foods*; 2007; ISBN 9780813824086.
- [13] De Prados, M.; García-Pérez, J. V.; Benedito, J. Non-Destructive Salt Content Prediction in Brined Pork Meat Using Ultrasound Technology. *J. Food Eng.* 2015, 154, 39–48, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.12.024.
- [14] Sanchez-Jimenez, V.; Collazos-Escobar, G.A.; Gonz, A.; Alvarez-Arenas, E.G.; Benedito, J.; Garcia-Perez, J. V Non-Invasive Monitoring of Potato Drying by Means of Air-Coupled Ultrasound. 2023, 148, 0–9, doi:10.1016/j.foodcont.2023.109653.
- [15] Martínez-Navarrete, N.; Moraga, G.; Talens, P.; Chiralt, A. Water Sorption and the Plasticization Effect in Wafers. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2004, 39, 555–562, doi:10.1111/j.1365-2621.2004.00815.x.
- [16]. Kim, K.B.; Lee, S.; Kim, M.S.; Cho, B.K. Determination of Apple Firmness by Nondestructive Ultrasonic Measurement. *Postharvest Biol. Technol.* 2009, 52, 44–48, doi:10.1016/j.postharvbio.2008.04.006.

CARACTERIZACIÓN DE GELATINAS MEDIANTE SENSORES ULTRASÓNICOS SIN CONTACTO

Anabella S. Giacomozzi¹, Virginia Sánchez Jiménez¹, María Callejo Signes², Jose Benedito¹, Jose V. García-Pérez^{1*}, Jorge Gosalbez²

¹Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Instituto de Ingeniería de Alimentos FoodUPV, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

²Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITeAM), Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España.

RESUMEN

En los últimos años, la industria alimentaria ha incrementado la demanda de técnicas no destructivas y de bajo coste capaces de caracterizar los productos de forma rápida y efectiva, en base a la necesidad de tomar decisiones en tiempo real para mejorar la eficiencia de las operaciones. Estos requisitos se alinean estrechamente con el concepto de Industria 4.0, que enfatiza la integración de tecnologías avanzadas para habilitar sistemas de producción inteligentes y eficientes. Entre las diversas técnicas disponibles, los ultrasonidos de señal han surgido como una técnica efectiva para caracterizar productos alimenticios, ofreciendo las ventajas de la automatización al mismo tiempo que se minimiza el riesgo de contaminación cruzada y se aumenta en gran medida la tasa de inspección. El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad de la técnica de ultrasonidos sin contacto para caracterizar gelatinas envasadas en moldes de silicona con diferentes contenidos de colágeno (1, 2, 4, 6, 8 y 10 % p/v). Se utilizó un modelo de propagación de múltiples capas, que permitió correlacionar los parámetros ultrasónicos con la concentración de sólidos y propiedades texturales de las gelatinas.

ABSTRACT

In the last years, there has been a growing demand in the food industry for rapid, cost-effective, and non-destructive techniques for automated inspection. This demand arises from the need to make real-time decisions in order to improve operations efficiency. These requirements align closely with the concept of Industry 4.0, which emphasize the integration of advanced technologies to enable intelligent and efficient production systems. Among the various techniques available, air-coupled ultrasound has emerged as an effective method for characterizing food products, offering the advantages of automation while minimizing the risk of cross-contamination and largely increasing inspection rate. The aim of this work is to test the feasibility of air-coupled ultrasound to characterize package jellies in silicone molds with different content of collagen (1, 2, 4, 6, 8, and 10, % w/v). For this purpose, a multi-layer ultrasonic propagation model was used and the identified ultrasonic parameters were satisfactorily correlated with collagen content and textural properties of the jellies.

Palabras Clave— ultrasonidos sin contacto, caracterización no-destructiva, modelización.

1. INTRODUCCIÓN

Los ultrasonidos son ondas mecánicas con frecuencias que superan el límite de la audición humana (>20 kHz) y necesitan un medio sólido, líquido o gaseoso para propagarse [1]. Los ultrasonidos pueden dividirse en dos grupos según su frecuencia e intensidad: de alta intensidad o de potencia: se caracterizan por una baja frecuencia (de 20 a 100 kHz) y alta intensidad (de 10 a 1000 W/cm²), y de baja intensidad o de señal, los cuales se caracterizan por altas frecuencias (de 100 kHz a 1 MHz) y bajas intensidades (<1 W/cm²). Las técnicas de ultrasonidos de baja intensidad han demostrado ser particularmente útiles como herramienta para el control de calidad de procesos industriales debido a su bajo costo, fácil mantenimiento, y alto grado de adaptabilidad a líneas de procesado [2]. El producto modifica la propagación de la señal ultrasónica, y esta modificación proporciona información sobre el mismo. De esta manera, se emplean para la caracterización y control de productos o procesos.

Las técnicas de ultrasonidos han sido utilizadas en diversas aplicaciones relacionadas con alimentos. En particular, la velocidad ultrasónica ha demostrado ser un indicador útil de las propiedades mecánicas y/o texturales de la carne [3, 4,5]. También se han aplicado con éxito ultrasonidos sin contacto para la caracterización de productos cárnicos crudo-curados [6], hamburguesas [7], patatas [8], y aguacate [9]. Por otro lado, se ha utilizado para medir el contenido de sal en piezas de cerdo [10]. La aplicación industrial de estas técnicas basadas en sensores de ultrasonido de aire es adecuada para los objetivos de la Industria 4.0: se puede implementar fácilmente en líneas de producción y es completamente no destructiva y no invasiva, lo que reduce drásticamente el riesgo de contaminación cruzada al permitir el escaneo de datos en tiempo real de las muestras [11].

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar algoritmos de procesado de señal que permitan extraer información o parámetros que se correlacionen con la concentración de sólidos en gelatinas para explorar la posibilidad de integrar la técnica de ultrasonidos acoplados por aire en procesos de control de calidad en línea de producción. Para ello, se plantea el desarrollo de algoritmos de procesado de la señal que extraigan parámetros ultrasónicos (amplitud de potencia, velocidad, frecuencia) y los correlacionen con las propiedades de interés de las gelatinas. Dentro de los parámetros ultrasónicos se han identificado parámetros temporales y frecuenciales y, además, se ha implementado un modelo de propagación multicapa.

* Autor de contacto: jogarpe4@tal.upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Preparación de gelatinas

Se prepararon muestras de gelatina (gelatina bovina 1% p/v, Sigma-Aldrich) en moldes de silicona de 9.2 cm de diámetro y 1.1 cm de altura. Para correlacionar los parámetros ultrasónicos con el contenido de sólidos en gelatina, se emplearon 6 concentraciones diferentes: (1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% p/v). Posteriormente, las muestras se dejaron enfriar durante 24 horas a 4°C hasta su análisis.

2.2 Sistema ultrasónico

Las medidas ultrasónicas sin contacto se realizaron utilizando un montaje experimental realizado por el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de València (Figura 1).

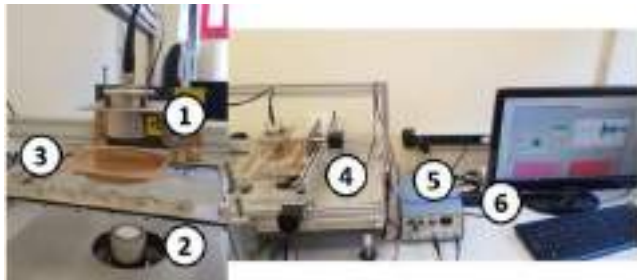


Figura 1. Sistema ultrasónico: montaje experimental. Transductor emisor (1), transductor receptor (2), muestra (3), módulo de barrido XY (4), generador/receptor (5), ordenador (6).

El sistema está compuesto por dos transductores piezoeléctricos (emisor y receptor), un generador-receptor de señal, un osciloscopio digital y un ordenador. Se emplearon transductores piezoeléctricos de 280 kHz (geometría plana) diseñados especialmente para mejorar su acoplamiento con el aire [12], que se situaron enfrentados verticalmente y perfectamente alineados (distancia= 10 cm).

La medida ultrasónica se realizó mediante la técnica de transmisión-recepción. El generador-receptor envía una señal eléctrica de excitación al transductor emisor. Al mismo tiempo, también emite otra señal que llega al osciloscopio (señal del trigger o disparo) para indicar el momento exacto en el que se ha enviado dicha señal eléctrica de excitación. El transductor emisor convierte la señal eléctrica de excitación en una señal ultrasónica. Esta señal ultrasónica viaja a través del aire, atravesando la muestra, hasta que es recibida por el transductor receptor, que ejecuta el proceso opuesto, es decir, la convierte en una señal eléctrica que es enviada de nuevo al generador-receptor para su acondicionamiento y amplificación. Finalmente, la señal es enviada al osciloscopio para su digitalización, que a su vez está conectado a un ordenador para el almacenamiento y análisis de la misma. La configuración de los parámetros del generador-receptor (5077PR, Panametrics, Estados Unidos) y osciloscopio digital (NI 6501, National Instruments, Austin, TX, USA) integrado con una tarjeta digital (PXI/PCI-5112, National Instruments, Austin, TX, USA) para la toma de medidas se muestra en la Tabla 1.

Con el fin de escanear toda la superficie del producto, se empleó un módulo de barrido automático 2D para realizar movimientos del producto con elevada precisión. Se realizaron 3 réplicas para cada concentración de sólidos en la gelatina. En cada replica se midieron 100 puntos distribuyendo las medidas en una matriz de 10x10, espaciados 5 mm. El espesor de la muestra se midió con un calibre digital (192-633 Serie, Mitutoyo, Japón). Antes de proceder a la

medida de las gelatinas, se realizaron diferentes medidas de calibración: se analizaron 4 señales del sistema sin molde ni gelatina (aire, señal de referencia), y 4 señales con molde, pero sin gelatina. Las medidas se realizaron en condiciones ambientales de 28.4°C y 44.9%HR.

Tabla 1. Parámetros de configuración del generador-receptor y del osciloscopio.

Generador-Receptor	Osciloscopio digital
Frecuencia de pulso: 100 Hz	Puntos adquiridos: 10000
Voltaje: 200 V	Velocidad de digitalización: 10 Mpuntos/s
Ganancia: 59 dB	Trigger: 10 % Nivel 0.1 V
Frecuencia: 0,25 MHz	Promedio de 128 señales

2.3 Cálculo de los parámetros ultrasónicos temporales

El análisis de las señales en el dominio temporal se basa fundamentalmente en el cálculo del tiempo de vuelo (TOF) y de la velocidad de propagación del ultrasonido en la gelatina a partir de este. La señal capturada refleja la propagación de la onda ultrasónica a través del aire y la muestra. Es evidente que a medida que transcurre el tiempo, la amplitud de la onda disminuye progresivamente. Esta atenuación se debe a la pérdida de energía que ocurre durante su tránsito por los distintos medios presentes en el recorrido (aire, gelatina, molde, aire). Al procesar la señal capturada, es posible detectar el tiempo que tarda la onda ultrasónica en recorrer la distancia entre el emisor y el receptor. La determinación del TOF se realizó siguiendo la metodología del frente de llegada de la onda ultrasónica [13]. A partir del TOF y teniendo en cuenta la configuración del experimental, se puede calcular la velocidad a la cual se propaga el ultrasonido en la gelatina:

$$V_g = \frac{d_{gelatina}}{TOF_m - \frac{d_{transd} - d_{gel} - d_{molde}}{c_{aire}} - \frac{d_{molde}}{c_{molde}} - T_{trigger} - T_{cal}} \quad (1)$$

Donde TOF_m corresponde al tiempo total medido, d_{gel} es el espesor de la gelatina en el molde, d_{molde} es el espesor del molde (1.34 mm), d_{transd} es la separación total entre transductores (140 mm), c_{aire} es la velocidad de propagación en el aire (343 m/s), c_{molde} es la velocidad de propagación en el molde (613.2 m/s), T_{cal} corresponde a un tiempo de calibración o retraso entre la señal eléctrica de trigger y la señal mecánica (25 μs) y $T_{trigger}$ son las premuestras adquiridas antes del disparo (100μs). Así, para estimar el TOF real en la gelatina es necesario compensar el tiempo total medido restando el tiempo que tarda la señal en atravesar las diferentes capas (aire, molde y aire).

2.4 Cálculo de los parámetros ultrasónicos frecuenciales

Una vez procesadas todas las señales, el análisis de las señales ultrasónicas en el dominio frecuencial se realizó mediante la transformación rápida de Fourier (FFT) de las señales temporales. Así, se obtuvo y se representó la densidad espectral de potencia (módulo de FFT) de todas y cada una de las señales.

2.5 Modelo de propagación teórico

El modelo de propagación teórico se planteó teniendo en cuenta la propagación de la onda ultrasónica a través de los distintos medios o capas. La onda se propaga desde el transductor emisor (Transductor 1), atravesando aire (Aire 1), gelatina (material 1), molde (material 2) y llega nuevamente a través de aire (Aire 2) al transductor receptor (Transductor 2) (Figura 2A).



Figura 2. Esquema base del modelo de propagación.

A partir de la señal emitida por el transductor emisor, se puede asumir que la señal sufrirá una atenuación y un retardo temporal al propagarse por cada uno de los materiales. La propagación de la onda vendrá controlada por su correspondiente coeficiente de transmisión (T) y reflexión (R) en cada interfaz. De esta forma, cada material se puede modelar como un cuádrupolo, con dos señales de entrada y dos señales de salida (Figura 2B). La primera señal de entrada corresponde a la señal proveniente del material anterior mientras que la segunda señal de entrada corresponde a la señal reflejada proveniente del material siguiente. Las señales de salida corresponderán a la señal transmitida al material siguiente y la señal enviada al material anterior.

A su vez, el cuádrupolo se puede representar mediante integración de bloques. En primer lugar, la señal de entrada

proveniente del material anterior sufre una atenuación y un retardo temporal al propagarse por el nuevo medio. Esta respuesta en frecuencia, está representada por el bloque $H_M(f)$. Siguiendo el recorrido de la onda ultrasónica, ésta procede a dividirse en dos, una parte se va a transmitir al siguiente medio, mientras la otra va a ser reflejada al material anterior. La proporción de onda que se refleja y que se transmite, viene dada por los coeficientes T y R obtenidos a partir del material actual y el material siguiente. Por otro lado, a la proporción de la onda que propaga al siguiente material se le debe añadir la contribución de la onda reflejada que proviene del material siguiente. De este modo, se obtiene la proporción de la onda que se transmite al siguiente material. De igual modo que sucede con la onda que se propaga del material anterior al actual, el ultrasonido que proviene del material siguiente, al pasar de medio a otro con distinta impedancia acústica, parte de la onda se refleja y parte se transmite atendiendo a los coeficientes T y R. En este caso, los coeficientes vienen dados por el material siguiente y el actual. Finalmente, a la contribución de la onda que se va a transmitir por el medio se le debe añadir la contribución de la onda que no se transmite al medio siguiente y, por lo tanto, se refleja. Al considerar en la suma de estas dos contribuciones el retardo temporal y la atenuación que sufre la onda, H_M , se obtiene la segunda salida del cuádrupolo, es decir, la señal que se refleja al material anterior. Este concepto se replicó para el modelo de propagación planteado. Desarrollando teóricamente este sistema y nombrando como Y_0, Y_1, Y_2 los puntos de salida de los cuádrupolos intermedios, e Y como la señal de salida final (Figura 3), es posible plantear el sistema de ecuaciones en forma matricial como $A*B=C$. Este sistema de ecuaciones se implementó en Simulink. A partir de este modelo, e incorporando los diferentes parámetros del sistema, fue posible simular la señal recibida.

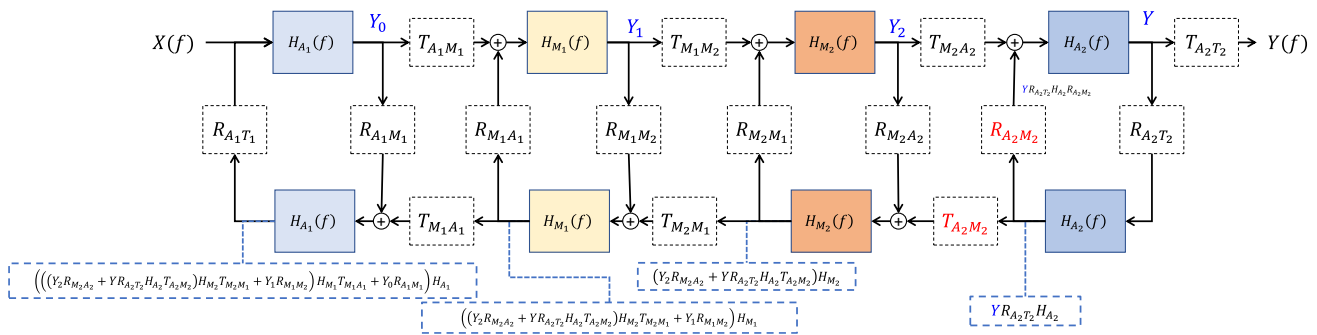


Figura 3. Representación de los cuádrupolos interconectados correspondientes al modelo teórico de propagación.

La impedancia acústica es una propiedad que poseen los medios que se refiere a la oposición que presenta un material al paso de una onda sonora. A partir de la impedancia acústica de cada material se calcularon los respectivos coeficientes de transmisión y recepción. Por otro lado, la densidad y la impedancia de la gelatina se calculó en función de la concentración de sólidos. Se asumió un valor de velocidad en la gelatina igual a 1535 m/s [15]. Respecto a la respuesta frecuencial, se asumió una respuesta frecuencial plana de los materiales con una ganancia lineal de 0.64, por tanto, su respuesta al impulso se modeló como:

$$h_{\text{material}}(t) = G_{\text{material}} \cdot \delta(t - t_{d,\text{material}}) \quad (2)$$

Donde G_{material} considera el factor de ganancia del material y $t_{d,\text{material}}$ el retraso introducido por el material. Idealmente se debería modelar la respuesta frecuencial completa de material. Sin embargo, esta aproximación ofrece buenos resultados a nivel temporal. Su respuesta en frecuencia se calculó como:

$$H_{\text{material}}(f) = G_{\text{material}} \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t_{d,\text{material}}} \quad (3)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se muestra la evolución de la velocidad (calculada a partir de la ecuación 1). Al contrario de lo esperado, no se observó una tendencia clara de la misma al aumentar el contenido de sólidos en la gelatina. Esto podría atribuirse a la influencia de la temperatura

en los valores calculados. La velocidad depende en gran medida de la temperatura, y dado que en este trabajo no se consideró para el cálculo, se estima que los resultados obtenidos podrían verse afectados. Por otro lado, el espesor del material también influye de manera significativa en los cálculos de velocidad, por lo que pequeños errores en la medición del mismo podrían causar variaciones significativas en los valores obtenidos.

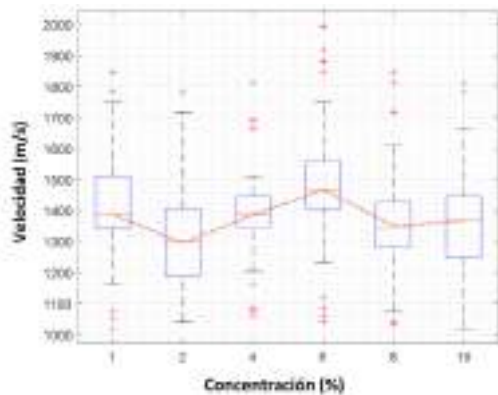


Figura 4. Velocidad ultrasónica en gelatina con diferente concentración de sólidos.

Al analizar el espectro de frecuencias, se identificó la presencia de 4 picos distintivos claramente identificables, correspondientes a la frecuencia de resonancia de la gelatina. Estos valores son

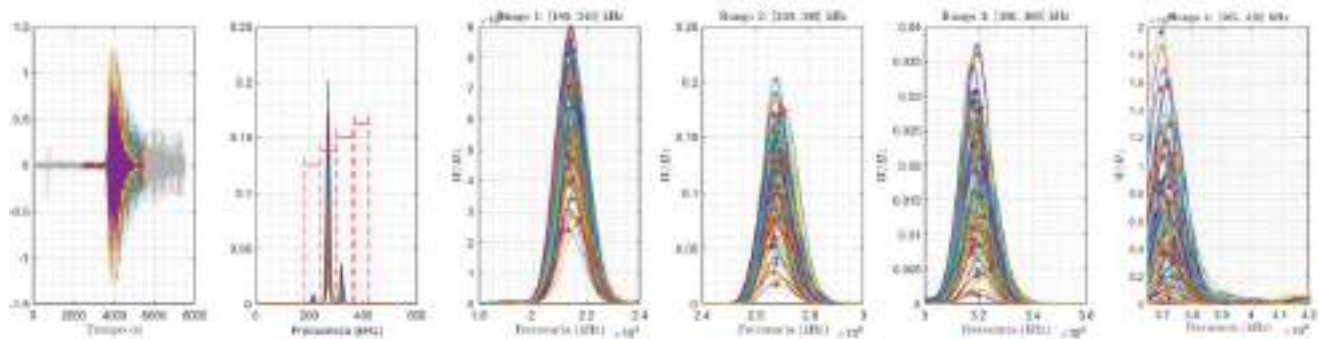


Figura 51. Señal temporal, espectro y bandas de búsquedas para muestras de gelatina al 1%.

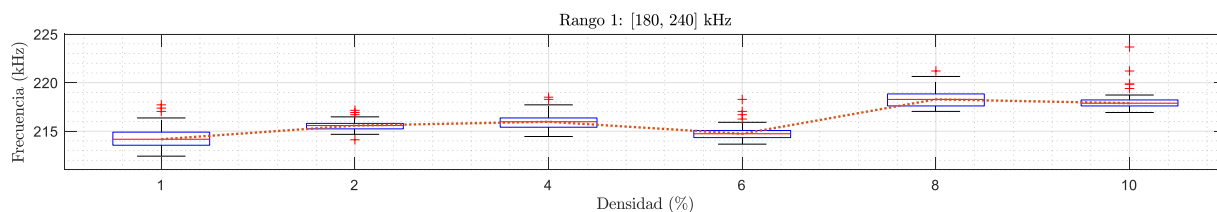


Figura 62. Frecuencias de resonancia en el rango de 180-240 kHz en gelatina con diferente concentración de sólidos.

3.1 Modelo de propagación

En el modelo de propagación, la respuesta en frecuencia de los diferentes materiales $H_M(f)$ se implementó en el dominio temporal como una función delta, $h_M(t) = K\delta(t-t_d)$, donde t_d representa el retardo experimentado por la señal al propagarse a través de cada

diferentes a la frecuencia de resonancia propia del transductor. Así, para cada señal registrada, se obtuvieron 4 frecuencias de resonancia junto con sus correspondientes amplitudes. De esta manera, se generó una matriz de 400 valores de frecuencia y amplitud para cada concentración evaluada (4 valores por cada una de las 100 señales). A continuación, se calcularon los valores promedio de amplitud de pico y frecuencia para cada concentración a partir de los datos recopilados previamente. A modo ilustrativo, en la Figura 5 se representan las señales junto con el segmento temporal seleccionado para realizar el análisis frecuencial, el espectro y las bandas frecuenciales para la búsqueda de los valores máximos, para la concentración de 1%.

Si se analiza la frecuencia de resonancia obtenida para cada concentración (Figura 6), se observa en general un incremento de la misma con el contenido de sólidos, a excepción de lo observado en el caso de la concentración de 6%. Este comportamiento es similar en los diferentes rangos de frecuencias (a modo de ejemplo, se muestra el comportamiento en el rango 180-240 kHz). Este resultado se corresponde con lo esperado, ya que al aumentar el contenido de sólidos se incrementa la rigidez del material y, por lo tanto, su frecuencia de resonancia es mayor. Además, se puede observar baja variabilidad entre las medidas correspondientes a una misma concentración, a diferencia de lo que se observa en la Figura 4 para la velocidad.

medio, y K es el factor de amplitud que modela la atenuación causada por cada material (0.64). La posición de la delta indica el tiempo que retarda cada material. Mediante la expresión $t = d/v$ resulta sencillo calcular esta posición puesto que d y v son valores conocidos correspondientes al espesor de cada material y la velocidad de propagación de cada uno de ellos, respectivamente. En

la Figura 7 se muestra el modelo de ajuste paramétrico planteado, el cual consiste en el modelo de propagación descrito anteriormente, donde se utiliza una señal de excitación de entrada y se obtiene una señal de salida. El objetivo es que la señal de salida sea lo más cercana posible a la señal de referencia (o señal medida). Para lograr esto, se compara la señal de salida con la señal de referencia (señal experimental) y se trata de minimizar una función de coste, calculada a partir del error entre el espectro de la señal modelada y la señal medida.

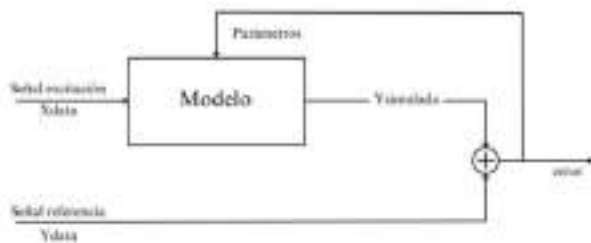


Figura 73. Esquema de ajuste paramétrico

Se ha seleccionado el dominio frecuencial debido a que en el dominio temporal existe una fuerte dependencia a los cambios de

fase. Es decir, el dominio frecuencial resulta más robusto que el dominio temporal para el cálculo de los parámetros ultrasónicos. Se utilizó la función “lscurvefit” de Matlab, la cual encuentra los parámetros que mejor ajustan la función simulada “Ysimulada” a la señal de referencia “Ydata” basándose en la señal de entrada.

Los coeficientes de entrada del modelo de propagación son las velocidades de los materiales v_{aire} , $v_{gelatina}$ y v_{molde} , y sus coeficientes de atenuación correspondientes: A_{aire} , $A_{gelatina}$ y A_{molde} . De estos seis parámetros, el sistema sólo ajusta la velocidad de la gelatina y el factor de amplitud que modela la atenuación causada por ésta, mientras que los parámetros del molde y el aire se mantienen constantes.

Dicho modelo, además de considerar la respuesta en frecuencia de cada material, tiene en cuenta los coeficientes de transmisión y recepción de la interfase de cada uno de ellos. Asumiendo las velocidades de la gelatina, es posible obtener la impedancia acústica de cada material y, en función de ésta, calcular los coeficientes de transmisión y reflexión, respectivamente, para considerarlos en el modelo del ajuste paramétrico. En la Figura 8 se muestra la representación del espectro real en comparación con el espectro obtenido por el modelo paramétrico (señal simulada).

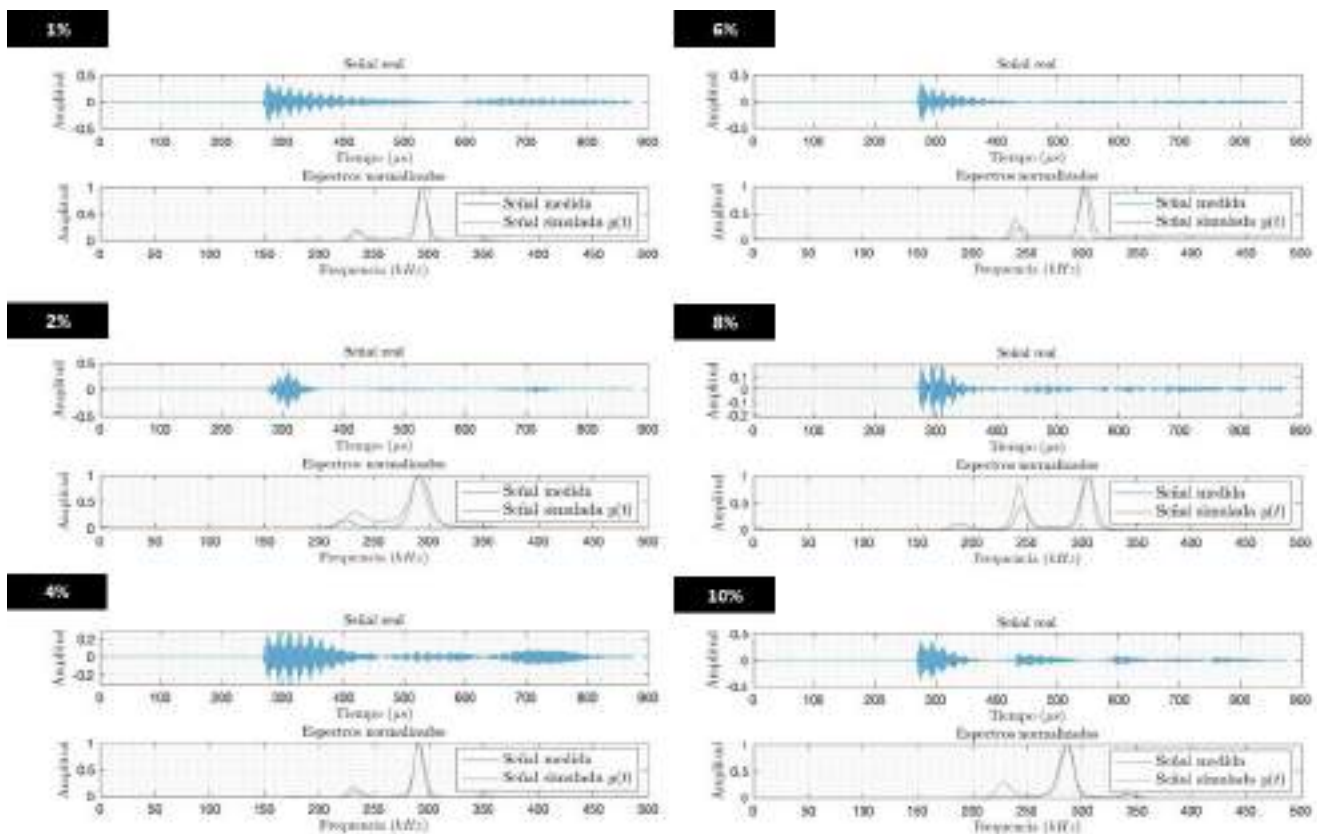


Figura 84. Espectro de frecuencias: medido vs. simulado.

En la Figura 9 se muestran los valores de velocidad obtenidos mediante el modelo paramétrico. Se observa una tendencia de incremento de la velocidad conforme aumenta el contenido de sólidos, tendiendo a estabilizarse a partir de la concentración de 8%.

Cabe destacar que las variaciones obtenidas en el espectro frecuencial son menores que las correspondientes al dominio temporal. La posibilidad de procesar el dominio espectral favorece la robustez en la estimación de los parámetros ultrasónicos ya que

permite analizar la totalidad de la señal ultrasónica, en lugar de trabajar sólo con una porción de la misma, como es el caso del análisis del dominio temporal y, además, evita la incertidumbre asociada a la estimación del espesor.

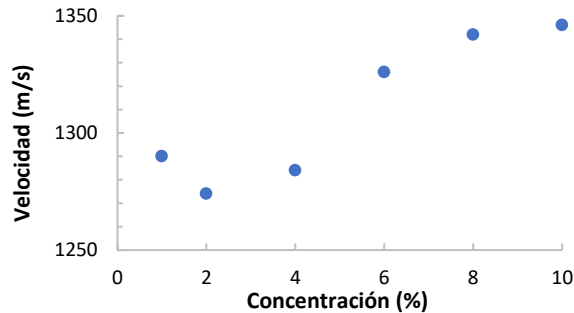


Figura 9. Velocidad ultrasónica en la gelatina para las diferentes concentraciones de sólidos: valores simulados por el modelo de propagación.

En la Figura 10 se muestra la variación de la dureza de las muestras de gelatina al modificar la concentración de sólidos en la misma.

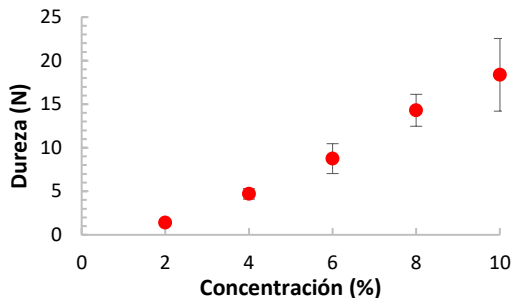


Figura 10. Velocidad ultrasónica en la gelatina para las diferentes concentraciones de sólidos: valores simulados por el modelo de propagación

4. CONCLUSIONES

- La frecuencia de resonancia se incrementó al aumentar la concentración de sólidos en la gelatina. Esto indica una relación directa entre la concentración de sólidos y la respuesta acústica de las muestras, debido a un incremento de la rigidez del medio (evidenciado por el incremento observado en la dureza).
- El análisis de los parámetros ultrasónicos en el dominio temporal resultó complejo debido a la gran influencia de la medida del espesor en los cálculos. La estimación del espesor conlleva gran incertidumbre debido al error experimental asociado con su medida en productos de espesor irregular.
- El procesado de los datos en el dominio espectral permitió mejorar el análisis de la señal ultrasónica, calculando la velocidad sin necesidad de estimar el espesor de la muestra.
- El modelo empleado demostró ser eficaz y robusto para ajustar la respuesta espectral. La predicción del espectro a partir del modelo paramétrico propuesto podría ser una herramienta eficaz para evaluar y cuantificar de forma robusta cómo cambian los parámetros ultrasónicos de la gelatina al modificar la concentración de sólidos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento provisto por el proyecto ULTRADIGITAL (AGROALNEXT/2022/045), el cual forma parte del programa AGROALNEXT, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos europeos NextGenerationEU (PRTR-C17.11), así como por la Generalitat Valenciana.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mulet, A., Benedito, J., Bon, J., & Sanjuan, N. (1999). Low intensity ultrasonics in food technology/Revisión: Ultrasonidos de baja intensidad en tecnología de alimentos. *Food Science and Technology International*, 5(4), 285-297.
- [2] Scanlon, M.G. (2004). Low-intensity ultrasound for food research and the food industry. *Food Research International*, 37(6), 535-536.
- [3] Corona, E., García-Pérez, J. V., Mulet, A., & Benedito, J. (2013). Ultrasonic assessment of textural changes in vacuum packaged sliced Iberian ham induced by high pressure treatment or cold storage. *Meat science*, 95(2), 389-395.
- [4] Llull, P., Simal, S., Femenia, A., Benedito, J., & Rosselló, C. (2002). The use of ultrasound velocity measurement to evaluate the textural properties of sobrassada from Mallorca. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 323-330.
- [5] Nowak, K. W., Markowski, M., & Daszkiewicz, T. (2015). Ultrasonic determination of mechanical properties of meat products. *Journal of Food Engineering*, 147, 49-55.
- [6] Corona, E., Garcia-Perez, J. V., Alvarez-Arenas, T. E. G., Watson, N., Povey, M. J., & Benedito, J. (2013). Advances in the ultrasound characterization of dry-cured meat products. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 464-470.
- [7] Fariñas, L., Contreras, M., Sanchez-Jimenez, V., Benedito, J., & Garcia-Perez, J. V. (2021). Use of air-coupled ultrasound for the non-invasive characterization of the textural properties of pork burger patties. *Journal of Food Engineering*, 297, 110481.
- [8] Sanchez-Jimenez, V., Collazos-Escobar, G. A., González-Mohino, A., Alvarez-Arenas, T. E. G., Benedito, J., & Garcia-Perez, J. V. (2023). Non-invasive monitoring of potato drying by means of air-coupled ultrasound. *Food Control*, 148, 109653.
- [9] Farinas, L., Sanchez-Torres, E. A., Sanchez-Jimenez, V., Diaz, R., Benedito, J., & Garcia-Perez, J. V. (2021). Assessment of avocado textural changes during ripening by using contactless air-coupled ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 289, 110266.
- [10] de Prados, M., Garcia-Perez, J. V., & Benedito, J. (2017). Non-invasive ultrasonic technology for continuous monitoring of pork loin and ham dry salting. *Meat science*, 128, 8-14.
- [11] Charoux, C. M., Ojha, K. S., O'Donnell, C. P., Cardoni, A., & Tiwari, B. K. (2017). Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 208, 28-36.
- [12] Alvarez-Arenas, T. E. G. (2004). Acoustic impedance matching of piezoelectric. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 51(5), 624-633.
- [13] Garcia-Perez, J. V., De Prados, M., Martinez, G., Alvarez-Arenas, T. G., & Benedito, J. (2019). Ultrasonic online monitoring of the ham salting process. Methods for signal analysis: Time of flight calculation. *Journal of food engineering*, 263, 87-95.
- [14] Gosálbez, J., Wright, W. M. D., Jiang, W., Carrión, A., Genovés, V., & Bosch, I. (2018). Airborne non-contact and contact broadband ultrasounds for frequency attenuation profile estimation of cementitious materials. *Ultrasonics*, 88, 148-156.
- [15] Ortí Anglés, C. (2012). Caracterización de Phantoms por ultrasonidos. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/17787>

CONFORMADOR DE IMAGEN ULTRASÓNICA BASADO EN REDES NEURONALES

Óscar Martínez-Graullera^{1*}

Carolina Bertoncini¹

Luis Elvira Segura¹

Montserrat Parrilla Romero¹

Alberto Ibáñez Rodríguez¹

¹Instituto de Tecnología Físicas y de la Información (CSIC)

C/Serrano 144, Madrid 2006, España

RESUMEN

El presente trabajo analiza el potencial de las redes neuronales profundas para configurar un conformador de haz para imagen ultrasónica capaz de reducir las aberraciones generadas por los lóbulos secundarios. Trabajando sobre un conjunto de señales simuladas como elemento de aprendizaje, los resultados obtenidos muestran que en un proceso de imagen de apertura sintética éste es un objetivo alcanzable y que además es posible mejorar la resolución lateral.

ABSTRACT

The current investigation delves into the capabilities of deep neural networks for configuring an ultrasonic beamformer with the ability to mitigate secondary lobe structures within images. Through experimentation with a collection of simulated signals, the results obtained underscore the feasibility of achieving this objective within a synthetic aperture imaging framework. Notably, data structure, improvements in lateral resolution are also demonstrated to be attainable..

Palabras Clave— Imagen ultrasónica, apertura sintética, virtual source, high frequency ultrasound.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos clásicos del procesamiento del señal en ultrasonidos es limitar los efectos de los lóbulos secundarios generados por el patrón de difracción de la apertura. Sobre una imagen, los lóbulos secundarios generan pérdida de contraste, de resolución lateral, contribuyen al patrón de

speckles y en general producen una pérdida de calidad en la imagen que condiciona su interpretación.

Un sistema basado en arrays puede hacer uso de su potencial como filtro espacial para reducir el impacto de los lóbulos secundarios. Las soluciones más clásicas, en base a filtros convencionales, lo hacen a costa de una pérdida de la resolución lateral, lo que desvirtua la eficiencia de la apertura. Otras soluciones, basadas en filtros adaptativos, como el conformador de mínima varianza, aunque muestran cierta capacidad para resolver la imagen manteniendo resolución y rango dinámico, con excelentes resultados en un espacio simulado, suelen presentar una significativa pérdida de rendimiento en aplicaciones reales. Estas soluciones sin embargo muestran que analizando la información capturada por el array es posible encontrar una función capaz de discriminar situaciones donde el lóbulo secundario oculta la presencia de un reflector.

En un proceso de estas características tanto la cantidad de la información como la calidad de la misma es un tema relevante. Operar con un sistema phased-array de N-elementos, donde las señales están parcialmente focalizadas por el proceso de emisión significa trabajar con un conjunto muestral de N señales. Con el mismo array, emplear un sistema de apertura sintética sobre el Full Matrix Capture (FMC) implica tener NxN señales con un mayor nivel de información a costa de reducir la relación señal a ruido. Este conjunto organiza su información sobre un esquema de frecuencias espaciales, conocido como coarray, con distintos niveles de redundancia. En el caso de un array lineal de N elementos esto supone un subconjunto de 2N-1 señales independientes [1].

Tomando un array de N elementos, donde de forma secuencial vamos disparando los i-elementos del mismo, y donde para cada disparo se reciben las señales en los j-

*Autor de contacto: primer.oscar.martinez@csic.es

Copyright: ©2023 Óscar Martínez Graullera et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

elementos ($i, j = 1, 2, \dots, N$). Podemos decir que las muestras que se corresponden por su tiempo de vuelo con el eco de un posible reflector en el punto x vienen dadas por el conjunto:

$$FMC(\vec{x}): \left\{ s_{ij}(\tau), \tau = \left| \frac{\vec{x} - \vec{x}_i}{c} \right| + \left| \frac{\vec{x} - \vec{x}_j}{c} \right|, \forall i, j = [1, N] \right\} \quad [1]$$

Dado que cada $s_{ij}(t)$ integra toda la señal de eco correspondiente a una elipse cuyos focos están en los elementos i (emisor) y j (receptor), esta señal se puede formular como:

$$s_{ij}(\tau) = m_{ij}(\vec{x}) + n_{ij}(\tau) \approx m(\vec{x}) + n_{ij}(\tau) \quad [2]$$

Donde $m_{ij}(x)$ hace referencia al eco de nuestro interés y $n_{ij}(t)$ es el eco del resto de la elipse que interfiere en nuestra medida. Siendo x es el punto en que todas las elipses intersectan. Por conveniencia vamos a considerar ese valor de reflectividad $m_{ij}(x)$ constante para toda $s_{ij}(t)$. Entonces la reflectividad en el punto de interés puede estimarse a partir de la suma de FMC(x) como:

$$\hat{m}(\vec{x}) = \left| m(\vec{x}) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N \frac{n_{ij}(\tau)}{N^2} \right| = |m(\vec{x}) + n(\vec{x})| \quad [3]$$

Donde esta estima es un sesgo de continua introducido en todas las muestras junto con una combinación del ruido eléctrico y ruido acústico que incluye la perturbación generada por los lóbulos secundarios. Ordenando la información la matriz de emisión recepción, se observa que los lóbulos secundarios se presentan como una oscilación periódica cuya frecuencia depende de la distancia angular del foco respecto al origen de la perturbación. En este sentido, el conformador convencional actúa como un filtro paso bajo que integra toda información contenida en FM(x) generando una estima robusta pero poco precisa. Obviamente, en una situación real, donde pueden intervenir múltiples fuentes, esta estimación de la reflectividad es aún menos eficiente.

En la figura 1 se representan a modo de ejemplo las 8x8 matrices de emisión/recepción de un array de 64 elementos en una rejilla espacial de 8x8 puntos alrededor de un reflector. Mientras que el ruido se representa como tal, las posiciones alrededor del reflector muestran un patrón oscilatorio de baja frecuencia que se desplaza en diagonal. Cuando este patrón está compuesto por un número impar de semicírculos se genera un lóbulo secundario.

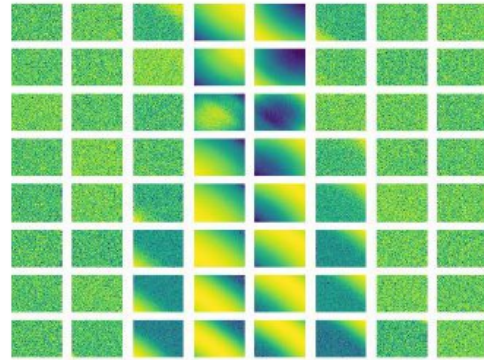


Figura 1. Las 8x8 matrices de emisión/recepción que corresponden a una rejilla espacial de 8x8 puntos.

Bajo esta interpretación, y tomando como referencia un modelo de pulso-eco basado en la respuesta espacial al impulso, simplificando el transductor como un elemento puntual [2], es posible diseñar un modelo de aprendizaje para redes neuronales que aprenda a identificar este hecho y reduzca su impacto en la imagen.

2. ESTRUCTURA DE LA RED NEURONAL

Dada la naturaleza de las redes neuronales un problema de estas características se puede plantear de diversas formas. Una opción es definir un problema de detección donde se genere un mapa de probabilidad de la presencia de blancos que pueda ser mapeado sobre la imagen convencional como una capa extra de información. Otra opción, la seguida en este trabajo, es generar una imagen con el potencial de ser sustitutiva de la imagen ultrasónica convencional donde se elimina la presencia de lóbulos secundarios [3,4,5].

2.1. La red neuronal

Nuestro diseño parte del análisis del contenido espectral del coarray para estimar la reflectividad de cada punto de la imagen. El modelo está basado en una red de 8 capas que al modelar una función regresiva se unen mediante funciones de activación lineales. La primera capa toma como entrada los componentes de más baja frecuencia del coarray y genera un total de 128 combinaciones como salida, procesando los componentes reales e imaginarios por separado se obtiene el envolvente para pasar a las siguientes capas. Estas, están formadas por 16 nodos cada una. El sistema se ha implementado con Tensorflow, empleando Python y Keras para diseñar la red e implementar las métricas de error [6]. En total, la red necesita estimar 5.889 coeficientes.

2.3. Modelo de referencia

La fase de aprendizaje se desarrolla en base a simulaciones. Usando un modelo sencillo de un array de 64 elementos puntuales, se han definido de forma aleatoria 1001 regiones de interés (o imágenes) de 64x64 puntos, donde hemos posicionado hasta un máximo de 12 reflectores distribuidos aleatoriamente y con una reflectividad aleatoria entre 0 y -30dBs. Con objeto de mejorar la casuística, garantizando siempre el correcto muestreo de la imagen, el espacio comprendido en la misma también se determina de forma aleatoria pudiendo parte de los reflectores quedar fuera de la imagen, aunque no así los lóbulos que generan.

Sobre este modelo se simulan las señales ultrasónicas correspondiente al Full Matrix Capture (FMC) para un nivel de SNR de 20dB y se determina para cada punto de la imagen las 4096 señales organizadas en matrices de emisión/recepción prefocalizadas. Los valores de las matrices se recombinan sobre el vector del coarray y se obtiene su FFT para determinar su distribución espectral. Dado que los lóbulos secundarios se encuentran en la parte más baja del espectro se valora únicamente el cuarto más bajo del rango de frecuencias. Para el caso que estamos considerando, esto son 16 coeficientes, el primero de los cuales constituye la estima del conformador DAS convencional.

Como modelo al que la solución debe converger, se diseña a partir del mismo patrón de ruido una nueva imagen donde los reflectores son modelados como campanas gaussianas generadas tomando como origen de referencia el centro del array en base a una distribución cilíndrica compatible con la naturaleza de la imagen ultrasónica (modulada axial y angularmente). El modelo mantiene la referencia de la resolución axial pero permite reducir la resolución lateral dentro de unos márgenes limitados.

3. RESULTADOS

Las figuras 2, 3 y 4 muestran un ejemplo asociado al modelo simulado. La figura 2 es la imagen ultrasónica obtenida a partir de un proceso de conformación DAS (delay-and-sum) convencional. La figura 3 es la imagen de referencia idealizada sobre la que se pretende converger. La figura 4 es el resultado de aplicar la red neuronal entrenada sobre el conjunto de datos simulados que genera la imagen 1. El resultado muestra que es posible reducir los lóbulos secundarios, aumentar la resolución lateral y mejorar el contraste de la imagen.

Para validar estos resultados con un ejemplo real, se analizaron datos tomados con un array de 64 elementos y 2.6MHz en un phantom CIRS 040GSE.

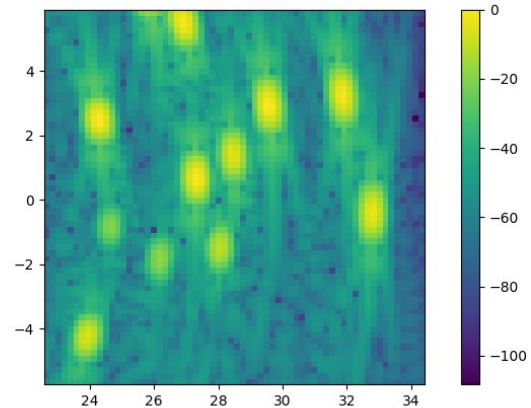


Figura 2. Imagen DAS convencional obtenida con datos simulados.

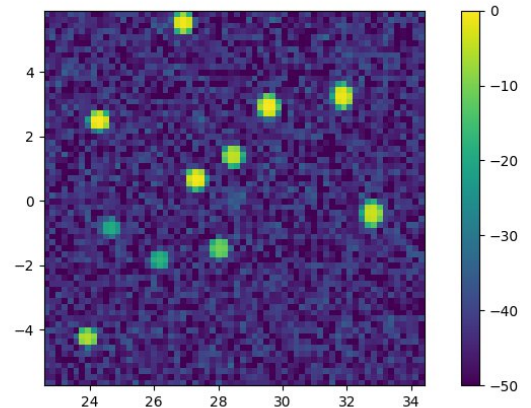


Figura 3. Imagen de referencia sobre la que se quiere converger.

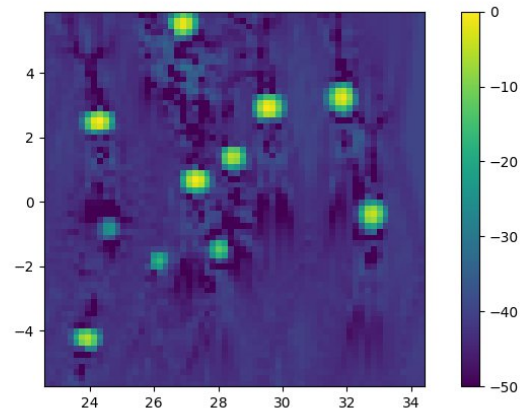


Figura 4. Imagen generada por la red neuronal.

En general todas las imágenes muestran que la red neuronal genera un mejor resultado que el DAS convencional. Incluso en un caso real, nuestra red elimina los lóbulos secundarios mejorando tanto el contraste como la resolución lateral. El resultado no afecta a la resolución axial. Un punto importante es que speckle del “tejido” mantiene los elementos principales y su reducción es un mero adelgazamiento debido al aumento de la resolución.

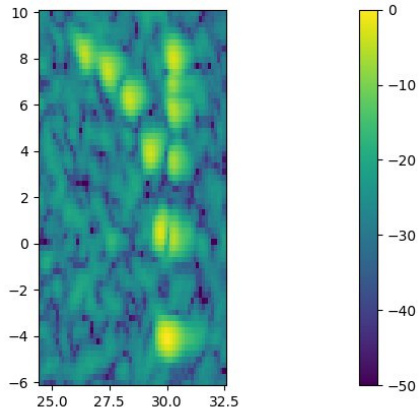


Figura 5. Imagen real obtenida con un conformador DAS.

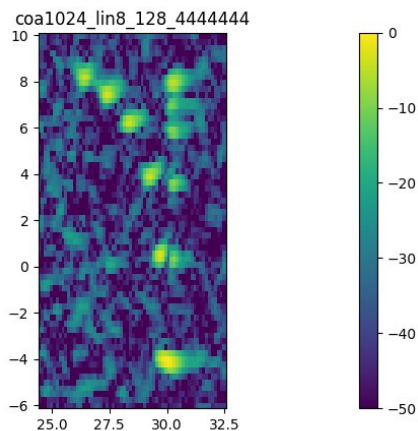


Figura 6. Imagen real obtenida con la red neuronal entrenada.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es posible diseñar un conformador basado en redes neuronales. No obstante, aunque se obtiene una importante mejora en la calidad de la imagen, en lo que respecta a la resolución lateral y a la reducción de los lóbulos secundarios, no se ha valorado que exista un incremento del rango dinámico. De hecho, en los ejemplos simulados se ha detectado la pérdida de algunos blancos con reflectividad inferior a -30dB s. Este es un aspecto que está bajo estudio ya que nos interesa aumentar la

certidumbre en los niveles más bajos del rango dinámico teórico, que para esta apertura está en -35dB .

Desde el punto de vista de su implementación práctica, la red muestra una estructura razonablemente simple que debido a la naturaleza lineal de las funciones de activación es posible implementar como una sola operación.

5. AGRADECIMIENTOS

Los resultados de esta publicación son parte de los proyectos de I+D+i PID2022-138013OB-I00 y PID2019-111392RB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/. En estos resultados también hay parte del proyecto ISABEL-202150E058.

12. REFERENCIAS

- [1] Gordon S. Kino. *Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*. Prentice-Hall, 1987
- [2] Carlos Julián Martín Arguedas, “Técnicas de apertura sintética para la generación de imagen ultrasónica”, Tesis doctoral, Universidad de Alcalá, Escuela politécnica superior, Madrid, 2010.
- [3] D. Hyun, L. Brickson, Kevin T. Looby y Jeremy J. Dahl, “Beamforming and speckle reduction using neural networks”, *IEEE Trans. on UFFC*, vol. 66, núm. 5, May 2019.
- [4] Ben Luitjen, Regev Cohen, Frederik J. de Bruijn, Harold A. W. Schmeitz, Massimo Misch, Yonina C. Eldar and Ruud J. G. van Sloun, “Adaptive Ultrasound Beamforming Using Deep Learning”, *IEEE Trans on Medical Imaging*, vol. 39, No. 12, December 2020.
- [5] Carolina Bertocini Fernández. *Diseño de un conformador de haz basado en Deep Learning para la mejora de la imagen ultrasónica*. Trabajo fin de grado. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 2022
- [6] Aurelien Geron. *Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. Ed. O'REILLY 2019

FOCALIZACIÓN DE APERTURA SINTÉTICA EN SISTEMAS MONOTRANSDUCTOR PARA AUMENTAR LA PROFUNDIDAD DE FOCO EN IMAGENES ULTRASÓNICAS DE ALTA FRECUENCIA

Óscar Martínez-Graullera^{1*}

Luis Elvira Segura¹

Carmén Durán Gómez¹

Montserrat Parrilla Romero¹

Alberto Ibáñez Rodríguez¹

Carla de León Morán¹

Ruslan Shaporin¹

¹Instituto de Tecnología Físicas y de la Información (CSIC)
C/Serrano 144, Madrid 2006, España

RESUMEN

El presente trabajo describe un procedimiento de imagen sintética adaptado a sistemas monotransductores focalizados de alta frecuencia. El objetivo de este sistema es aumentar el rango de la profundidad de foco para así aumentar el espacio de imagen de alta frecuencia que es capaz de abarcar el sistema.

ABSTRACT

The current study delineates a procedure for synthetic imaging tailored to high-frequency focused monotransducer systems. The primary objective of this system is to increase the depth of focal range, thereby expanding the expanse of high-frequency imaging space encompassed by the system.

Palabras Clave— Imagen ultrasónica, apertura sintética, virtual source, high frequency ultrasound.

1. INTRODUCCIÓN

La imagen ultrasónica a frecuencias superiores a los 20MHz tiene una gran utilidad como herramienta diagnóstica y de investigación, ya que hace posible resolver e identificar partículas y estructuras de reducido tamaño. No obstante, la obtención de estas imágenes plantea múltiples dificultades. A frecuencias altas, el ultrasonido sufre una gran atenuación que impone límites a la profundidad de penetración en los tejidos. Aunque se puede emplear sistemas focalizados para mejorar la penetración, la dificultad de disponer de transductores en array en estas gamas de frecuencia hace que la principal solución se base en sistemas monotransductores. La serie de equipos.

Los transductores focalizados, diseñados con una gran superficie radiante, generan un frente de ondas de alta energía y alta resolución lateral que no obstante esta limitada a una profundidad de foco reducida. No obstante, estos sistemas, apoyados con un sistema de movimiento, se emplean para obtener una imagen de muy alta calidad aunque limitada al rango de profundidades del foco. Varias son las empresas que han destacado por el desarrollo de este tipo de equipos: Quantel Medical, ArcScan Inc. SonoMed Escalon, Ellex Medical Lasers Ltd, Tomey Corp, S-sharp, etc. algunas de las cuales incluyen técnicas para mejorar su profundidad de foco.

El presente trabajo se enmarca en el desarrollo de una plataforma tecnológica de imagen ecográfica de alta frecuencia orientada al desarrollo de técnicas de caracterización de tejidos en investigación preclínica. Este sistema opera en un amplio rango de frecuencias (entre 20MHz y 60MHz) empleando un transductor focalizado con una profundidad de foco de apenas 200micras.

Nuestro objetivo es desarrollar un modo de apertura sintética que incremente el rango de la profundidad de foco, aumentando el tamaño de la imagen enfocada al tiempo que se mantiene las propiedades de la textura del tejido. En este artículo analizamos aspectos prácticos basados en el trabajo experimental con probetas similares de tejidos biológicos.

2. LA APERTURA VIRTUAL

El mecanismo es relativamente sencillo. Supone que en el foco existe un elemento “virtual” que genera un haz con el ángulo de apertura correspondiente al elemento original. Entonces, sobre un conjunto de adquisiciones consecutivas que superponen su espacio de radiación más allá del foco, se

*Autor de contacto: primer.oscar.martinez@csic.es

pueden implementar un procesado de apertura sintética sin deflexión que permite focalizar sobre esa zona común. Para ello se usa la parte de la señal recibida más allá de la zona focal. Esta técnica se propuso inicialmente para aplicaciones de ecografía dermatológica [1].

El concepto evolucionó en los sistemas de arrays cuando se propuso emplear la lente del array para simular la existencia de una fuente colocada en una posición predeterminada. En un sistema de arrays podemos colocar a esta fuente virtual en un punto tras el array (lente divergente) o en el propio foco de la lente (lente convergente). El interés está en que permite virtualizar cualquier tipo de apertura e incrementar el nivel de energía radiada [2].

No obstante, en la práctica su aplicación no está exenta de dificultades. El transductor virtual no actúa como el elemento puntual que supone la teoría. Es necesario limitar el tamaño de la apertura y se deben aplicar una serie de ajustes que tienen que ver tanto con el transductor como con las características del tejido sobre el que se trabaja, que deben ayudar a mantener equilibrada la imagen. Además se deben de considerar las consecuencias de la apodización para reducir los lóbulos secundarios y la posibilidad de aumentar la apertura de forma dinámica. Estos aspectos son los que centran este trabajo.

3. CARACTERIZACION DEL TRANSDUCTOR

Para nuestra aplicación es un transductor de S-SHARP de banda muy ancha capaz de operar en el rango de 15 a 60MHz, con un diámetro de 6 mm y una lente de focalización para 9.4mm. Con una resolución axial de 2micras y una resolución lateral de 20 micras

En la figura 1 presentamos el ancho de banda del transductor. En la figura 2 el campo medido en pulso eco usando como reflector el corazón de una fibra de vidrio de 10micras.

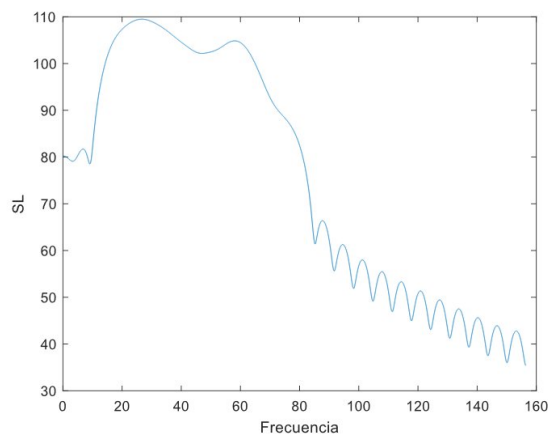


Figura 1. Ancho de banda del transductor. Medida experimental

Lo más particular de este transductor es su gran ancho de banda. En los medios que se están considerando la atenuación es mayor en las altas frecuencias lo que modifica el pulso y desplaza el contenido de la energía de la señal hacia bajas frecuencias

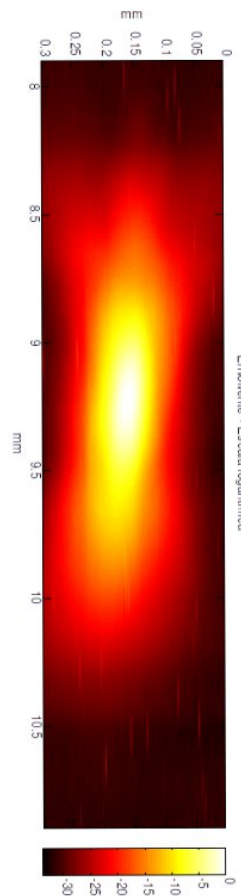


Figura 2. Campo en pulso-eco obtenido experimentalmente

3.1 El montaje experimental

El montaje experimental se enfoca en la caracterización de tejidos. Para ello hemos diseñado una probeta escalonada a modo de símil de tejido con materiales basado en PVA (10%) en donde se ha distribuido de forma uniforme un conjunto de reflectores de partículas de alúmina con una concentración al 3%.

El experimento consiste en obtener la imagen transversal del escalón más grande, una sección de 10x4mm. Para obtener una imagen completa de la pieza se hicieron una serie de barridos (hasta un total de 47) a diferentes profundidades (con pasos de 0.17 mm). En cada barrido se obtuvieron 1900 señales con 625 puntos muestreados a una frecuencia de 313MHz. En la figura 3 el montaje instrumental en el laboratorio.

El material atenúa las altas frecuencias, lo que cambia las características del pulso y su ancho de banda. La figura 4

muestra como cambia esta respuesta comparando la captura 11 y la captura 41.

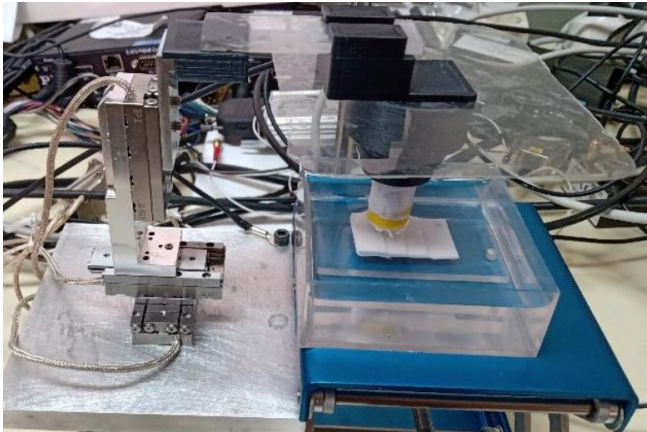


Figura 3. Montaje experimental

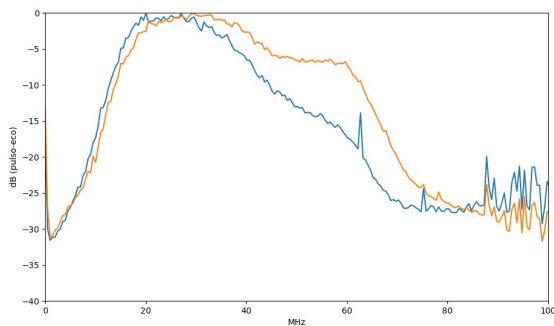


Figura 4. Ancho de banda de la captura 11 (línea naranja) y de la captura 41 (línea azul).

La figura 5 muestra la imagen que se obtiene en la captura 11, y la figura 6 la imagen completa obtenida de ensamblar las partes focalizadas de todas las adquisiciones.

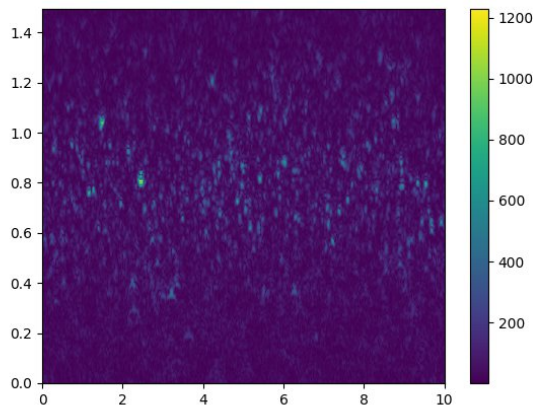


Figura 5. Imagen obtenida en la captura 11

4. DISEÑO DE LA FOCALIZACIÓN

La solución clásica de la focalización es sencilla, sobre el foco se coloca nuestro emisor/receptor virtual y desde este punto el conjunto de datos se divide en dos. De esta forma se generan dos procesos de focalización, uno sobre la zona prefoco y otro en la zona postfoco. No obstante, esta división produce una discontinuidad en el foco [3] que es necesario corregir.

Para solventar este inconveniente. En este trabajo diseñamos una estrategia con tres regiones de focalización distintas. Usando un modelo de la caída del campo en pulsoeco para transductores focalizados [4], al que hemos introducido un factor de atenuación dependiente de la frecuencia y la distancia, establecemos un punto de corte en -2 dB quedando dos datos divididos en tres zonas: pre-foco (con 262 muestras), foco (con 129 muestras) y post-foco (con 234 muestras). Para evitar la discontinuidad causada por el foco colocamos los focos de las zonas *pre* y *post*, en la zona focalizada desplazándolos hasta el corte de -1.5dB señalado sobre la curva anterior.

Mientras la zona focalizada mantiene los resultados de la adquisición en las otras dos zonas, la operación de focalización *pre* y *post* es tipo Delay-and-Sum con un tipo de apertura dinámica que crece con un ángulo que es el 60% del ángulo de apertura del haz (17.5°). Sobre la apertura se aplica una apodización promediada con el objetivo de reducir los lóbulos secundarios. Como paso final se compensa la caída del campo según el mismo modelo ya referido para definir las zonas de focalización.

5. RESULTADOS

Los resultados para la captura 11 se pueden ver en la figura 6

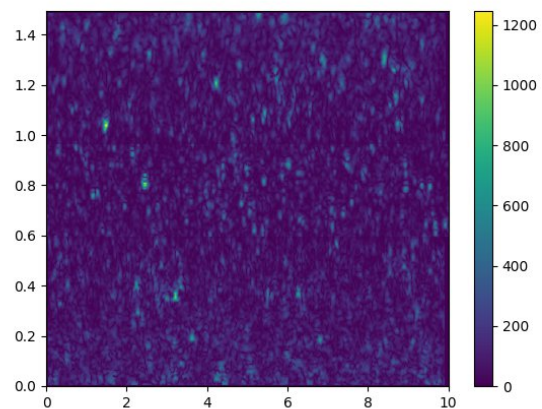


Figura 6. Imagen enfocada según los principios de la apertura virtual.

Frente a la figura 5, la figura 6 presenta una profundidad de campo mucho mayor tanto en la zona previa al foco como en la zona post-foco. Podemos decir que se ha extendido el foco a todo el rango de la imagen.

Este resultado podemos compararlo con la figura 7, donde se presenta la imagen de la misma región generada a partir del ensamblado de las regiones focalizadas de 16 imágenes consecutivas (40 muestras por imagen). Se observan similitudes pero también diferencias. En nuestra opinión, dada la aleatoriedad de la distribución de los focos y la similitud de los resultados de la captura 11 con las capturas adyacentes 10 y 12, estas pueden estar debidas a holguras en el sistemas de barrido que ha podido causar un ligero balanceo del cabezal durante la experimentación.

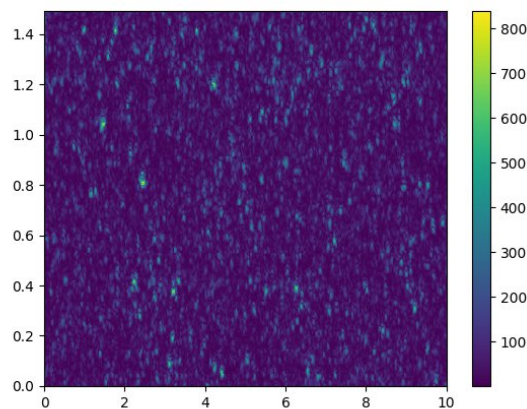


Figura 7. Imagen ensamblada con las regiones focalizadas de 16 imágenes que se corresponde con el espacio barrido por la captura 11.

Conforme a estos resultados podemos obtener un imagen transversal de la pieza ensamblando las capturas 1, 14, 27 y 40. El resultado se presenta en la figura 8.

6. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es posible aumentar la profundidad de foco de un transductor focalizado mediante técnicas de aperturas sintética. La solución propuesta a partir de la división en tres regiones con una apertura dinámica ha resuelto el problema de la singularidad en el foco. El modelo del perfil axial de campo ha sido útil equilibrar la amplitud de la imagen. Las imágenes muestran que en la zona prefoco este procedimiento tiene un mejor resultado.

Los trabajos futuros se centran en reducir el coste computacional de cara a su integración en la instrumentación, así como en la integración de mecanismos de compensación para la dispersión que mejoren el resultado de la focalización. Figure 8. Imagen completa de la pieza ensamblada con las imágenes refocalizadas,

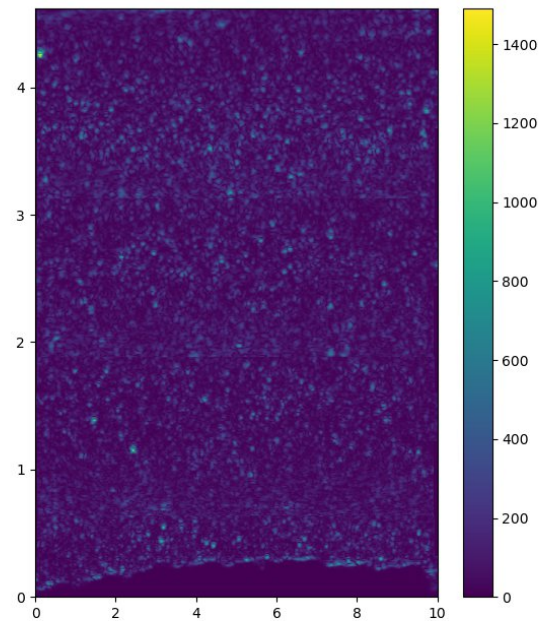


Figure 8. Imagen completa de la pieza ensamblada con las imágenes refocalizadas.

7. AGRADECIMIENTOS

Los resultados de esta publicación son parte de los proyectos de I+D+i PID2022-138013OB-I00 y PID2019-111392RB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/.

8. REFERENCIAS

- [1] C. Passman and H. Ermert, "A 100 MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, vol. 43, pp. 545-552, July 1996.
- [2] C. H. Frazier and W. D. O'Brien, "Synthetic aperture techniques with a virtual source element," in *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 45, no. 1, pp. 196-207, Jan. 1998, doi: 10.1109/58.646925.
- [3] Bottenus N. Comparison of virtual source synthetic aperture beamforming with an element-based model. *J Acoust Soc Am.* 2018 May;143(5):2801. doi: 10.1121/1.5036733. PMID: 29857713; PMCID: PMC5943081.
- [4] Lerch, T.P., Schmerr, L.W. & Sedov, A. Characterization of spherically focused transducers using an ultrasonic measurement model approach. *Res Nondestr Eval*, 1-21 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF02434041>



IMPROVING SNR AND BANDWIDTH OF SHEAR-WAVE DISPLACEMENTS VIA MODULATED FORCE EXCITATION

Enrique González-Mateo^{1*}, Francisco Camarena¹, Noé Jiménez¹

¹Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular, CSIC - Universitat Politècnica de València, España

ABSTRACT

Ultrasound shear wave elastography aims to induce shear waves in soft tissues through dynamic stress and assess their elasticity by measuring wave velocity. However, limitations in ultrasound imaging, including shadowing, reverberation, and depth-dependent attenuation, often result in low signal-to-noise ratio (SNR) signals, which pose challenges for capturing shear waves. This study proposes a method to overcome these limitations and obtain reliable shear wave information. The method involves using long modulated force excitations to generate tissue motion and demodulating the resulting displacements from pulse code excitations. This demodulation separates individual impulse responses, allowing for the recovery of the original pulse shape and enhancing displacement amplitude and SNR. Simulations using soft tissue elastic pseudospectral time domain techniques prove that the method, employing coded excitations like maximum-length sequences and frequency sine sweep, increases the time-bandwidth product and achieves significant SNR improvement through pulse compression. By improving the quality of displacement data and reducing noise, the method enhances the robustness of algorithms used to estimate shear wave propagation speed, minimizing the potential for biased results.

Keywords— *Shear waves, Elastography, Soft tissue, Signal to noise ratio, Pulse compression.*

1. INTRODUCTION

Elastography is a medical imaging technique that is increasingly being employed in medicine. In contrast to traditional anatomical imaging, elastographic imaging supplies functional information about the elasticity of soft tissue. The combination of anatomical and elastographic imaging can provide valuable insights for detecting pathologies such as fibrosis or prostate cancer [1], [2].

The mechanism for measuring the elastic properties of tissue involves three phases: (1) The first phase involves stimulating the tissue to generate shear waves, which move at a much lower speed (1.5-10 m/s) than the propagation speed of soft tissue (1540 m/s). There are two primary methods for exciting the tissue: passive methods, such as external exciters, and dynamic methods, such as acoustic radiation force (ARF). (2) The second phase involves capturing the displacements of the shear waves generated during excitation. Various medical imaging technologies, such as magnetic resonance imaging, ultrasound, or optical methods, can be used for this purpose. (3) The final phase involves reconstructing the elasticity map based on the displacements. Through this process, we can figure out the velocity of shear waves propagating through the tissue and calculate the mechanical properties of the tissue, which, in purely elastic tissue, are related to Young's modulus,

$$E = 3c_s^2 \rho_0 \quad (1)$$

where c_s is the shear velocity and ρ_0 is the density of the medium. Elastographic image formation methods rely heavily on the quality of shear wave displacements, which can be compromised by factors such as reflections, medium attenuation, and shear wave attenuation.

This paper proposes a novel shear wave generation method based on long ARF pulses modulated with random sequences (MLS). MLS is a pseudo-random binary sequence with a period of $2N - 1$ generated by a linear recursion of degree N [3]. Such signals are commonly used to measure the impulse responses of linear time-invariant systems in acoustic and audio systems due to their high signal-to-noise ratio (SNR) and robustness against impulsive or non-stationary disturbances. The goal is to enhance the SNR by calculating the impulse response of the medium using pulse compression techniques initially used in general with radar applications [4].

*Contact author: engonmar@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which allows unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, supplied the original author and source are credited.

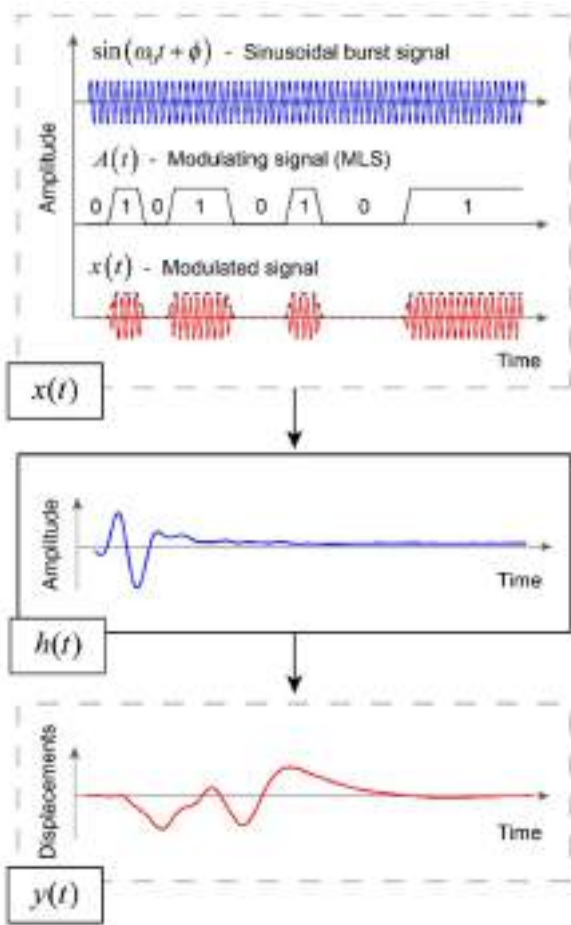


Figure 1. Graphic diagram of the linear time-invariant system. The upper block refers to the system input $x(t)$, which results from modulating an ARF signal with an MLS signal. The middle block is the impulse response of the medium $h(t)$. The lower block refers to the system output in terms of displacement $y(t)$ generated by exciting the medium with $x(t)$.

This paper presents the fundamentals of the method and the results obtained from pseudo-spectral time simulations used for method validation.

2. METHODS

Figure 1 illustrates the operational framework of the proposed method. The technique relies on the use of broadband excitation signals, in this case, pseudorandom, to obtain the impulse response of the medium, assuming it behaves as a linear time-invariant (LTI) system.

The first step involves generating a pseudorandom MLS sequence of degree N [5]. Since the SNR gain depends on the code length and is proportional to $10 \cdot \log_{10}(N)$, it is desirable to create long binary codes that are also invertible and

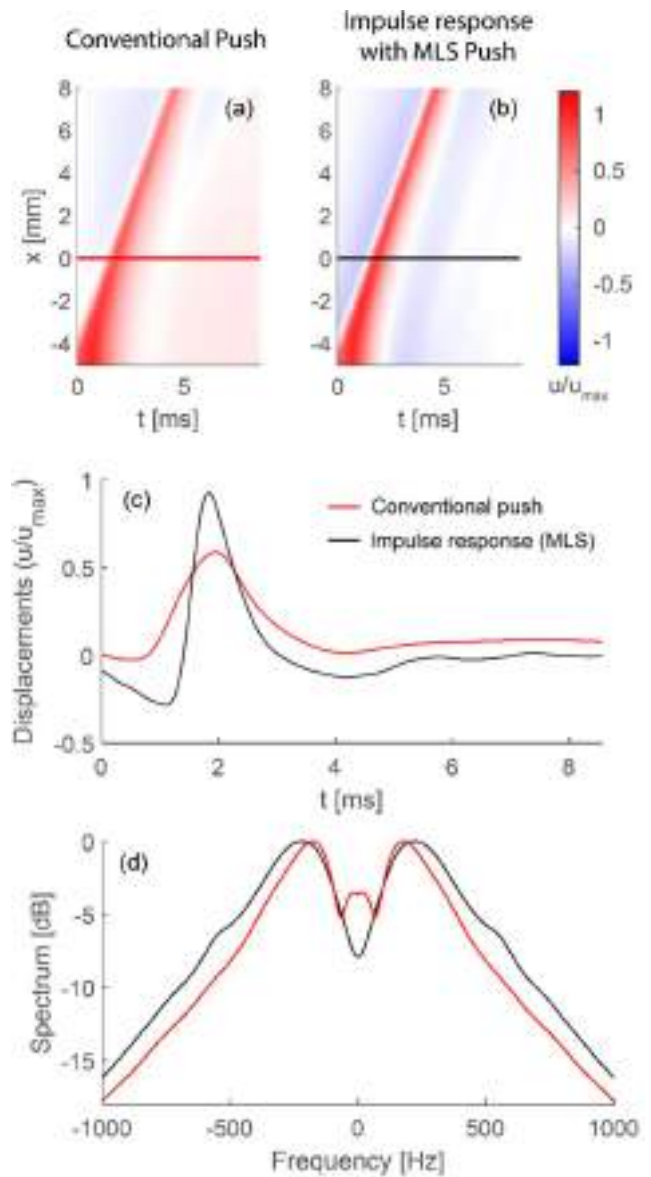


Figure 2. Comparison of the displacement map obtained using the conventional push method (a) and the proposed method (b). In figures (c) and (d), temporal and frequency analyses, respectively, are represented in a cross-section at $x = 0$ mm for the conventional case (red) and the impulse response obtained when exciting with MLS (black).

asymmetric [6]. This binary MLS sequence serves as the modulating signal $A(t)$ for the sinusoidal carrier signal with frequency ω_0 , initial phase ϕ_0 , and length N_{cycles} ,

$$x(t) = A(t) \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (2)$$

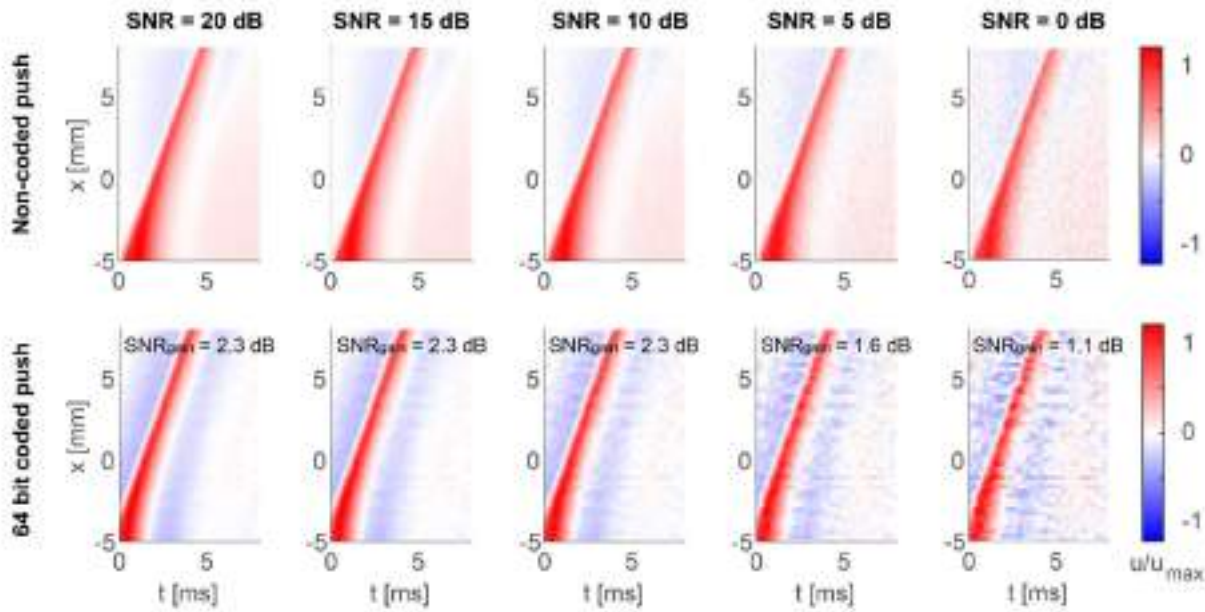


Figure 3. Comparison of the displacement maps obtained with the conventional push method (top row) with the impulse response obtained through coded push (bottom row) for different noise levels added. The lower row represents the signal to noise gain between both methods.

where t is the time vector. The result of the modulation, $x(t)$, is the high-frequency waveform that excites the medium, while $A(t)$ corresponds to the ARF that serves as the input to our LTI system. The modulation process is graphically represented in the upper block of Figure 1. The aim of exciting the medium with ARF is to generate stresses that can be translated into displacement terms, which form the output of our system, $y(t)$, as shown in Figure 1 below.

Once we have determined the input and output of our linear system, we can obtain the impulse response, $h(t)$, by deconvolution of the obtained displacements $y(t)$ with the amplitude-modulated ARF signal $A(t)$. Deconvolution can be performed in either the time or frequency domain. The classical approach involves frequency domain deconvolution as

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}[y(t)]}{\mathcal{F}[A(t)]} \right] \quad (3)$$

where \mathcal{F} and \mathcal{F}^{-1} are the direct and inverse Fourier transforms, respectively. Using MLS signals for this type of inverse filtering approach is relevant since they are invertible, meaning there are no zeros in the Fourier domain. The result of the deconvolution supplies the impulse response of the system, as shown in the intermediate block of Figure 1.

To confirm the method, pseudospectral elastic simulations in the time domain were performed. The simulation involves

figuring out the acoustic field of the simulated transducer. In this case, the acoustic field of a pulse focused at 20 mm was simulated using a 64-element phased-array transducer at a frequency of 2.72 MHz. This acoustic field serves as the input parameter for elastic simulations conducted using the k-Wave toolbox. A homogeneous elastic medium was simulated with the following parameters: propagation velocity of 1540 m/s, shear velocity of 2.45 m/s, density of 1000 kg/m³, and longitudinal absorption of 0.5 dB/MHz/cm.

Finally, a study was conducted to evaluate the improvement in signal-to-noise ratio (SNR) as a function of the MLS sequence degree. For this purpose, MLS-based ARF signals of three different degrees ($N = 5$, $N = 6$, and $N = 7$) were simulated. To assess SNR improvement when obtaining the impulse response, different levels of white Gaussian noise was added to the displacement signals obtained after exciting the medium with these signals. SNR was measured according to Equation (4), where P_S is the power of the signal of interest, and P_N is the power of the noise.

$$SNR = 10 \log_{10} (P_S / P_N) \quad (4)$$

To compare the SNR enhancement the SNRgain was calculated as the ratio difference between the coded and non-coded excitation,

$$SNR_{gain} = SNR_{coded} - SNR_{non-coded} \quad (5)$$

3. RESULTS

To confirm the improvement in signal-to-noise ratio and bandwidth of the method, a comparison was made with the conventional method, which employs a single focused ARF pulse of shorter duration, typically between 500 and 1000 cycles. In contrast, the proposed method uses signals in the range of 20 to 100-103 cycles.

In Figure 2(a) and (b), displacement maps in the lateral direction over time are plotted. The maps show straight lines characterized by slopes, which can be described as the velocity of the medium in that specific region. To quantify the results more effectively, Figure 2(c) displays a time slice of the displacement at position $x = 0$ for both methods. It proves that the proposed method yields a more impulsive response compared to the conventional method, resulting in a broader bandwidth of the displacement response, as depicted in the frequency domain analysis in Figure 2(d).

Finally, to verify the improvement in the SNR ratio, Figure 3 presents the results of impulse response using a coded push excitation of 64 bits ($N = 6$). Different levels of gaussian noise from 0 to 20 dB, where 0 dB is the noisiest displacements. Although the displacement maps may look noisier in some of the coded cases, if we analyze the SNR individually for each map, we can see that the SNR gain is always positive, that means the SNR is higher for the coded sequences.

4. CONCLUSIONS

In this study, we introduced a coded excitation framework using pseudo-random signals to enhance the signal-to-noise ratio (SNR) in shear wave displacements within soft tissues. Through simulation studies, we demonstrate significant improvements in SNR by using pseudo-random sequence coded signals to amplitude modulate the radiation acoustic power. As future work, we propose to analyze the SNR improvement as a function of different levels of sequence length, in addition to experimental validations. These findings hold promise for advancing the field of elastographic ultrasound imaging, potentially improving its utility in clinical applications.

5. BIBLIOGRAPHY

- [1] L. Castera, X. Forns, y A. Alberti, «Non-invasive evaluation of liver fibrosis using transient elastography», *J. Hepatol.*, vol. 48, n.º 5, pp. 835-847, may 2008, doi: 10.1016/j.jhep.2008.02.008.
- [2] L. Pallwein *et al.*, «Real-time elastography for detecting prostate cancer: preliminary experience», *BJU Int.*, vol. 100, n.º 1, pp. 42-46, 2007, doi: 10.1111/j.1464-410X.2007.06851.x.
- [3] M. R. Schroeder, «Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, n.º 2, pp. 497-500, ago. 1979, doi: 10.1121/1.383103.
- [4] C. E. Cook, «Pulse Compression-Key to More Efficient Radar Transmission», *Proc. IRE*, vol. 48, n.º 3, pp. 310-316, mar. 1960, doi: 10.1109/JRPROC.1960.287599.
- [5] G. T. Buračas y G. M. Boynton, «Efficient Design of Event-Related fMRI Experiments Using M-Sequences», *NeuroImage*, vol. 16, n.º 3, Part A, pp. 801-813, jul. 2002, doi: 10.1006/nimg.2002.1116.
- [6] C. Bleakley y R. Scaife, «New formulas for predicting the accuracy of acoustical measurements made in noisy environments using the averaged m-sequence correlation technique», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, n.º 2, pp. 1329-1332, feb. 1995, doi: 10.1121/1.412176.

Caracterización Ultrasónica De Las Constantes Ortotropías Elásticas De Materiales De Impresión 3D

Josep Rodríguez Sendra^{1*}
Alicia Carrión García²
Francisco Camarena Femenía²

¹Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Valencia, España

²Universitat Politècnica de València (UPV), Valencia, España

RESUMEN

El uso de materiales de impresión 3D ha aumentado considerablemente en los últimos años. Su bajo coste y versatilidad han supuesto su uso en muchas y muy diversas aplicaciones como son la fabricación de metamateriales absorbentes, la fabricación de fantasmas para ultrasonidos o la fabricación de lentes acústicas entre otras. Sin embargo, el empleo de esta tecnología requiere de un exhaustivo y riguroso estudio de las propiedades acústicas y mecánicas de los materiales resultantes.

En este trabajo se emplea un ensayo de ultrasonidos para la caracterización de 7 resinas fotosensibles. Se emplea una configuración transmisión-recepción a 1 MHz para extraer las velocidades longitudinales y transversales en 12 direcciones diferentes. Se ha llevado a cabo un detallado proceso de calibración de los equipos de medida implicados y del algoritmo de post-procesado de señal. Asumiendo ortotropía se han calculado los módulos de Young y de cizalla dinámicos, así como las constantes de Poisson. Este estudio pretende proporcionar una base de datos precisa de las propiedades acústicas y mecánicas determinadas por ultrasonidos de los materiales impresos en 3D, útil para su amplia y creciente gama de aplicaciones.

ABSTRACT

The use of 3D printing materials has increased considerably in recent years. Their low cost and versatility have led to their use in many different applications such as the manufacture of absorbing metamaterials, the manufacture of phantoms for ultrasound or the manufacture of acoustic lenses, among others. However, the use of this technology requires an exhaustive and rigorous study of the acoustic and mechanical properties of these materials.

In this work an ultrasonic test is used for the characterization of 7 photosensitive resins. A 1 MHz transmitter-receiver configuration is used to extract longitudinal and transversal velocities in 12 different configurations. A detailed calibration process of the measuring equipment involved and of the signal post-processing algorithm has been carried out. Assuming orthotropy, the dynamic Young's and shear moduli and Poisson's constants have been calculated. This study aims to provide an accurate database of ultrasonically determined acoustic and mechanical properties of 3D printed materials, useful for their wide and growing range of applications.

Palabras Clave— Ultrasonidos, Ortotropía, Módulos Elásticos, Materiales 3D.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de materiales de impresión 3D ha aumentado considerablemente en los últimos años, pasando progresivamente de la creación de prototipos al desarrollo de productos finales. En el campo biomédico, esta tecnología se aplica a la producción de prótesis personalizadas ad-hoc, la fabricación de tejidos, la administración de fármacos y la fabricación de fantasmas para distintas modalidades de imagen. La mejora de la calidad de la impresión 3D también ha impulsado el desarrollo de transductores de bajo coste para controlar campos acústicos complejos basados en lentes holográficas [1]. En todos estos casos es necesario un conocimiento sólido de las propiedades acústicas y mecánicas de estos materiales de uso común. En este trabajo se utilizarán ultrasonidos para caracterizar las propiedades elásticas de diferentes materiales impresos con distintas tecnologías 3D: estereolitografía (SLA) y Polyjet, analizando la anisotropía de los materiales fabricados por adición, con el objetivo de proporcionar una técnica no destructiva para

* **Autor de contacto:** jorodsen@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

calcular las propiedades mecánicas de los materiales de impresión 3D.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. Teoría

Las propiedades elásticas de un material pueden describirse mediante la Ley de Hooke generalizada, que relaciona el vector de tensiones σ con el vector de deformaciones ϵ .

$$\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j \quad (1)$$

donde C_{ij} se conoce como matriz de rigidez. Para materiales transversalmente isotrópicos (materiales ortotrópicos), la matriz de rigidez, C_{ij} , viene dada por

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Hay doce componentes distintos de cero, de los cuales nueve son independientes. La relación tensión-deformación también puede darse en términos de la matriz de flexibilidad $S_{ij} = [C_{ij}]^{-1}$ tal que

$$\epsilon_i = S_{ij}\sigma_j \quad (3)$$

Los coeficientes de flexibilidad pueden expresarse además en términos de las constantes elásticas, los módulos de Young generalizados E , los módulos de cizalla G y las relaciones de Poisson ν . Las constantes elásticas se definen de la siguiente manera:

- E_i : Módulo Young en la dirección i .
- G_{ij} : Módulo de Cizalla en el plano i - j .
- ν_{ij} : Relación de Poisson para la deformación en la dirección j cuando se somete a una tensión en la dirección i .

Para un material ortotrópico, la matriz de flexibilidad, S_{ij} expresada en términos de las constantes elásticas viene dada por

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Estas constantes suelen medirse en ensayos sencillos, como los de tracción uniaxial o cizallamiento. Las constantes, con su evidente interpretación física, tienen un significado más directo que los componentes de la relativamente abstracta matriz de rigidez.

La ecuación de Christoffel [2] permite relacionar los elementos del tensor elástico con la velocidad de propagación del sonido v y la densidad ρ dentro de un medio sólido en direcciones preestablecidas.

$$\Gamma_{il}A_l = \rho v^2 A_i \quad (5)$$

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl}n_j n_k \quad (6)$$

donde C_{ijkl} es el tensor de rigidez, n_j y n_k son componentes del vector de dirección de propagación de onda, v es la velocidad de onda experimental y ρ es la densidad. En este estudio, las 9 constantes independientes están completamente relacionadas con las velocidades de onda longitudinal y transversal a lo largo de 6 direcciones de propagación identificadas.

2.2. Materiales

En este estudio se han estudiado siete materiales impresos en 3D a partir de dos tecnologías de fabricación diferentes, estereolitografía (SLA) y Polyjet (PJ). En la Tabla 1 se resumen las tecnologías de impresión, las empresas y las impresoras utilizadas:

Tabla 1 Descripción de los materiales

Tecnología	Maquina/Compañía	Material
Polijet	Connex 350, Stratasys (Edina, US)	VeroWhite
	Estereolitografía (SLA)	Form 2, Formlabs (Somerville, US)
ProX 800, 3D Systems (Rock Hill, USA)		Rigid 4K Rigid 10K
		Clear Vue

La forma de la muestra desarrollada por Van Buskirk [3] permite caracterizar las muestras en 6 direcciones de propagación diferentes. Se estableció un sistema de coordenadas local alineado con las tres direcciones principales del material determinadas visualmente (figura 1). Los ejes x_1 y x_2 conforman el plano laminar y el eje perpendicular x_3 es la dirección de fabricación. Además, las direcciones 12, 13 y 23 se definen para simplificar la notación al medir las velocidades de onda en las caras a 45°. Se

midieron un total de 18 velocidades de onda diferentes para cada muestra de material. La figura 1 ilustra los ejemplares de muestras caracterizados impresos con su particular forma de impresión.



Figura 1. Ilustración de las muestras de distintos fotopolímeros impresas en 3D. Obsérvese la geometría característica utilizada en la fabricación, que permite medir la velocidad de propagación en 6 direcciones diferentes. Las tres direcciones principales x_1 y x_2 forman el plano laminar, y la dirección perpendicular, x_3 es la dirección de fabricación.

2.3. Dispositivo experimental

Para determinar las velocidades de propagación longitudinal y transversal se utiliza un equipo de transmisión ultrasónica. Los equipos de ultrasonidos fueron transductores longitudinales (V103 RM, Olympus) y transversales (V153 RM Olympus) centrados a 1 MHz y se utilizó un pulser-receiver de ultrasonidos (Panametrics Modelo 5072) para emitir y recibir los pulsos acústicos. La señal recibida se digitalizó con una plataforma de adquisición de datos (Red Pitaya) a una frecuencia de muestreo de 125 MHz. Se ha llevado a cabo un detallado proceso de calibración de los equipos de medida implicados y del algoritmo de post-procesado de señal. La figura 2 muestra el dispositivo experimental y la guía de carril utilizada. Además, se imprimieron en 3D dos soportes para los transductores con el fin de alinear las sondas y minimizar los errores de medición.

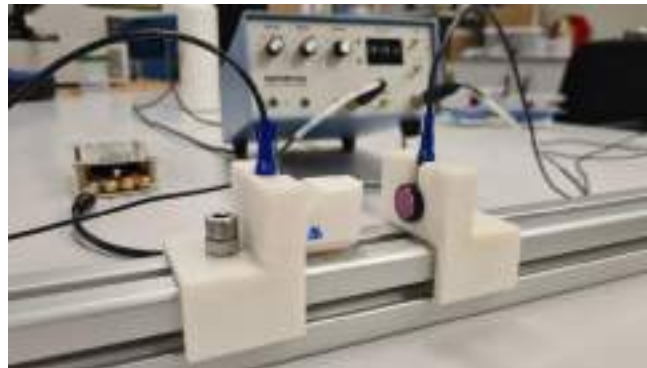


Figura 2. Dispositivo experimental, soporte de sujeción impreso en 3D para alinear los transductores emisor y receptor, la muestra se inserta entre los transductores.

3. RESULTADOS

Las tablas 2 y 3 muestran las velocidades longitudinales y transversales obtenidas mediante ultrasonidos, para ello se calculó la velocidad de fase de estos materiales a partir de una señal de referencia. Para el Rigid 10K se han encontrado notables diferencias de comportamiento entre los distintos ejes: una diferencia de 22 m/s en la velocidad longitudinal y de 20 m/s en la transversal. Por el contrario, se ha encontrado una gran estabilidad en el comportamiento entre ejes para los materiales Vero White y Grey. Las constantes elásticas se calcularon con la matriz de cumplimiento Ecuación 4 que es la inversa de la matriz de rigidez.

En la Tabla 4, presentamos los resultados para cada material, el módulo de Young en las tres direcciones principales de fabricación E_1 , E_2 y E_3 , el módulo de cizalla G_{12} , G_{23} y G_{31} y los coeficientes de Poisson ν_{12} , ν_{13} y ν_{23} . El módulo de Young oscila entre 3,48 GPa (Clear Vue) y 16,3 GPa (Rigid 10K), y el módulo de cizalladura entre 1,24 GPa y 6,24 GPa, respectivamente

Tabla 2 Velocidad de fase longitudinal a 700 kHz.

	Velocidad longitudinal (m/s)					
	V_{11}	V_{22}	V_{33}	$V_{12,12}$	$V_{13,13}$	$V_{23,23}$
Vero White	2420 ± 1.9	2419 ± 1.8	2423 ± 1.6	2410 ± 2.3	2416 ± 2.4	2407 ± 2.6
Clear Vue	2315 ± 3.1	2324 ± 2.3	2304 ± 2.0	2308 ± 2.8	2303 ± 1.2	2307 ± 1.2
White	2572 ± 2.0	2556 ± 3.0	2575 ± 1.6	2560 ± 5.0	2558 ± 0.9	2560 ± 3.7
Grey	2544 ± 2.1	2534 ± 2.0	2534 ± 1.8	2530 ± 1.6	2532 ± 2.1	2524 ± 2.7
Clear	2590 ± 3.1	2583 ± 4.1	2569 ± 4.2	2569 ± 2.9	2568 ± 1.9	2566 ± 2.7
Rigid 4K	2636 ± 3.6	2639 ± 2.5	2618 ± 5.0	2642 ± 2.5	2634 ± 2.2	2635 ± 4.2
Rigid 10K	3428 ± 11.7	3436 ± 13	3445 ± 9.5	3427 ± 8.7	3420 ± 9.4	3423 ± 7.8

Tabla 3 Velocidad de fase transversal a 700 kHz.

	Velocidad Transversal (m/s)					
	$V_{1,2}$	$V_{1,3}$	$V_{2,3}$	$V_{12,3}$	$V_{13,2}$	$V_{23,1}$
Vero White	1105 ± 0.3	1106 ± 1.8	1102 ± 0.6	1102 ± 0.6	1094 ± 1.7	1096 ± 1
Clear Vue	1049 ± 0.7	1039 ± 0.6	1047 ± 0.9	1043 ± 0.9	1043 ± 0.6	1038 ± 0.5
White	1197 ± 2.2	1196 ± 1.2	1193 ± 2.1	1195 ± 0.9	1197 ± 1.2	1200 ± 0.8
Grey	1197 ± 0.9	1195 ± 1.6	1193 ± 0.8	1193 ± 1.0	1198 ± 0.8	1198 ± 0.5
Clear	1211 ± 1.9	1214 ± 1.9	1211 ± 1.3	1214 ± 1.3	1214 ± 0.6	1212 ± 1.1
Rigid 4K	1294 ± 1.8	1296 ± 0.4	1297 ± 0.8	1297 ± 1.0	1295 ± 0.4	1296 ± 1.9
Rigid 10K	1905 ± 0.7	1895 ± 2.2	1898 ± 2.6	1899 ± 2.4	1915 ± 1.7	1898 ± 2.7

Tabla 4 Constantes mecánicas a partir de la velocidad de fase a 700 kHz.

	Módulo de Young (GPa)			Módulo de Cizalla (GPa)			Constantes de Poisson		
	E1	E2	E3	G1	G2	G3	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}
Vero White	4.07	4.14	4.12	1.46	1.45	1.45	0.35	0.37	0.36
Clear Vue	3.55	3.62	3.48	1.24	1.26	1.26	0.37	0.38	0.35
White	4.78	4.61	4.77	1.69	1.68	1.69	0.36	0.34	0.37
Grey	4.71	4.71	4.68	1.69	1.68	1.69	0.35	0.36	0.35
Clear	4.99	4.94	4.84	1.75	1.74	1.74	0.36	0.36	0.34
Rigid 4K	5.92	5.94	5.85	2.24	2.24	2.23	0.35	0.35	0.34
Rigid 10K	16.08	16.14	16.3	6.17	6.19	6.24	0.27	0.27	0.28

4. CONCLUSIONES

Un ensayo no destructivo por ultrasonidos es adecuado para determinar las constantes mecánicas de los materiales fotopolímeros impresos en 3D. Mediante este ensayo de emisión-recepción, no se han encontrado diferencias significativas entre la dirección de fabricación y el plano de laminación para los materiales y técnicas de impresión analizados. Además, el error obtenido es menor al 0.1%, los resultados presentan una gran estabilidad y fiabilidad. Este estudio pretende proporcionar una base de datos precisa de las propiedades acústicas y mecánicas determinadas por ultrasonidos de los materiales impresos en 3D, útil para su amplia y creciente gama de aplicaciones.

5. REFERENCIAS

- [1] Jiménez-Gambín, S., Jiménez, N., Benlloch, J. M., Camarena, F. (2019). Holograms to focus arbitrary ultrasonic fields through the skull. *Physical Review Applied*, 12(1), 014016.
- [2] Christoffel (E.B.) [GMA] *Gesammelte mathematische Abhandlungen*, 2 vols., Leipzig-Berlin: Teubner, 1910.
- [3] Van Buskirk, W. C., Cowin, S. C., Ward, R. N. (1981). Ultrasonic measurement of orthotropic elastic constants of bovine femoral bone. 67-72.
- [4] Bakaric, M., Miloro, P., Javaherian, A., Cox, B. T., Treeby, B. E., Brown, M. D. (2021). Measurement of the ultrasound attenuation and dispersion in 3D-printed photopolymer materials from 1 to 3.5 MHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150(4), 2798-2805.

EVALUACIÓN DE ALGORITMOS BASADOS EN LA RESPUESTA AL IMPULSO ESPACIAL DEL TRANSDUCTOR PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE UN MICROSCOPIO FOTOACÚSTICO CON ESCANEEO LÁSER RÁPIDO

Javier A. Navarro-Calvo^{1*}, Alejandro Cebrecos¹, Juan J. García-Garrigós¹, Francisco Camarena¹

¹Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (I3M), Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) - Universitat Politècnica de València (UPV), València, España

RESUMEN

La microscopía fotoacústica de resolución óptica (OR-PAM) es una novedosa técnica de imagen biomédica capaz de ofrecer información *in-vivo* con alta resolución espacial de agentes de contraste endógenos como la hemoglobina o la melanina. Debido a la baja amplitud típica de las señales fotoacústicas, es común en esta modalidad utilizar transductores monoelemento focalizados, capaces de ofrecer una elevada sensibilidad a lo largo de su foco acústico. Sin embargo, fuera de esta zona la sensibilidad se reduce drásticamente, limitando el campo de visión e impidiendo la obtención de imágenes de gran área utilizando escaneo láser rápido. En este trabajo se han implementado los algoritmos *Spatially-Variant Filter* (SVF), *Spatial Matched Filter* (SMF) y *Weighted Back-Projection* (WBP), analizando y caracterizando su rendimiento en la compensación de la respuesta al impulso espacial de un transductor focalizado en un sistema de microscopía fotoacústica. Las imágenes obtenidas muestran una mejora sustancial de la relación señal a ruido, ampliando el campo de visión efectivo de la imagen en un orden de magnitud (desde 0.1 hasta 1 mm²), mejorando la calidad de la imagen y reduciendo el tiempo de adquisición, facilitando así la implementación de sistemas de microscopía fotoacústica en aplicaciones clínicas.

ABSTRACT

Optical resolution photoacoustic microscopy (OR-PAM) is a novel biomedical imaging technique capable of providing *in-vivo* information with high spatial resolution of endogenous contrast agents such as hemoglobin or melanin. Due to the low amplitude that photoacoustic signals have, it is common in this modality to use focused single-element transducers capable of providing high detection sensitivity along their acoustic focus. However, outside this zone the sensitivity is drastically reduced, limiting the field of view and hindering large image areas using fast laser scanning. In this work, the

Spatially-Variant Filter (SVF), *Spatial Matched Filter* (SMF) and *Weighted Back-Projection* (WBP) algorithms have been implemented, analyzing and characterizing their performance in compensating the spatial impulse response of a focused transducer in a photoacoustic microscopy system. The obtained photoacoustic images show a substantial improvement of the signal to noise ratio, enlarging the effective field of view of the image by an order of magnitude (from 0.1 to 1 mm²), improving the image quality and reducing the acquisition time, thus facilitating the implementation of photoacoustic microscopy systems in clinical applications.

Palabras Clave — imagen fotoacústica, OR-PAM, transductor focalizado monoelemento, respuesta al impulso espacial.

1. INTRODUCCIÓN

La imagen fotoacústica es una modalidad emergente de imagen biomédica basada en la excitación de un tejido mediante un haz láser pulsado, el cual tras sufrir una expansión termoelástica, emite ondas acústicas de alta frecuencia que son detectadas mediante transductores de ultrasonidos [1]. En fotoacústica (PA), el contraste viene dado por diferencias en la absorción óptica entre las moléculas, la cual depende de la longitud de onda de la excitación láser [2]. La técnica explota esta propiedad sobre algunos cromóforos endógenos como la hemoglobina o la melanina, permitiendo obtener imágenes de alto contraste de lesiones vasculares o dérmicas como el melanoma.

Existen diferentes modalidades de imagen fotoacústica en función del campo de visión, del proceso de excitación y de la adquisición de las señales. La microscopía fotoacústica, en la cual se enmarca este trabajo, es capaz de obtener imágenes de elevada resolución de zonas de tejido iluminadas por el láser a profundidades de varios milímetros,

* **Autor de contacto:** janacal@i3m.upv.es

Copyright: ©2023 Javier A. Navarro-Calvo et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

mucho mayores que las técnicas de imagen puramente ópticas. En particular, la microscopía fotoacústica de resolución óptica (OR-PAM de su acrónimo en inglés) utiliza un haz láser muy focalizado para generar ondas acústicas. Por tanto, el tamaño del foco óptico marca la resolución lateral del sistema, llegando a obtener imágenes con resoluciones inferiores a una micra [2].

En OR-PAM, la imagen se obtiene mediante un mecanismo de escaneo del punto focal láser dentro del tejido con el fin de obtener imágenes volumétricas (3D). Comúnmente, se utilizan ejes motorizados para escanear conjuntamente el haz láser y el detector, el cual suele ser un transductor focalizado monoelemento cuyo foco acústico se alinea con el foco óptico para garantizar una buena sensibilidad en la recepción de las ondas ultrasónicas [3]. Algunos autores han propuesto el uso de sistemas de escaneo láser rápido por medio de espejos galvanométricos manteniendo estático el detector para ganar rapidez y reducir así el tiempo de adquisición. Estos permiten obtener áreas de imagen de hasta $6 \times 6 \text{ mm}^2$ en menos de un minuto [4,5]. Para ello, se suelen emplear transductores monoelemento planos (no focalizados) o sondas lineales multielemento con focalización electrónica (*phased array*), los cuales tienen un campo de visión (FOV) amplio a costa de una considerable reducción de su sensibilidad de aproximadamente 40 dB [3]. La realización de escaneos láser dentro del foco acústico del transductor focalizado (normalmente menor de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$) junto con un escaneo mecánico que mueva el cabezal del microscopio para ampliar el área final se ha propuesto para conseguir imágenes de alta calidad mejorando los tiempos de adquisición respecto al escaneo únicamente mecánico [6]. Existe, por tanto, un compromiso entre la sensibilidad de la detección, que afecta directamente a la calidad de imagen, y el tiempo de adquisición.

A lo largo de la última década, distintos grupos han desarrollado diferentes algoritmos de formación de imagen fotoacústica para la mejora de la calidad de esta, especialmente en otras modalidades como la tomografía fotoacústica (PAT) o la microscopía de resolución acústica (AR-PAM), donde comúnmente se utilizan sondas ultrasónicas de múltiples elementos. La inclusión de las propiedades espaciales del transductor utilizado en dichos algoritmos ha resultado ser de gran ayuda para obtener imágenes con menos artefactos, mayor resolución y relación señal-ruido (SNR) [7-11]. Estos están basados en la respuesta al impulso espacial (SIR) del transductor, la cual debe ser calibrada previamente a la adquisición de la imagen mediante métodos experimentales o de simulación numérica [12]. Existe un trabajo que utiliza un algoritmo basado en la respuesta espacial de un transductor monoelemento aplicado a OR-PAM para mejorar la respuesta del sistema a lo largo del eje óptico de focalización, el cual consiguió mejorar la SNR hasta 10 dB y su resolución axial un 30% [13]. Sin

embargo, hasta donde sabemos, este tipo de algoritmos todavía no se han empleado todavía para conseguir ampliar el campo de visión del transductor más allá del foco acústico, al orden de milímetros, con una calidad de imagen uniforme.

En este trabajo se propone implementar tres algoritmos basados en la respuesta al impulso espacial de un transductor focalizado monoelemento mediante simulación numérica, para evaluar su rendimiento en la compensación de dicha respuesta fuera del foco acústico y la ampliación del rango de escaneo láser del microscopio, y por tanto el campo de visión, lo que permitirá adquirir imágenes rápidas y al menos un orden de magnitud superior al tamaño del foco acústico con gran sensibilidad.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. Algoritmos basados en la respuesta al impulso del transductor

2.1.1. Fundamento teórico

Dado que la detección y conversión de señales ultrasónicas se define como un sistema lineal invariante en el tiempo, las propiedades espaciales y frecuenciales del transductor pueden modelarse mediante su respuesta al impulso. Un transductor esférico que rodea completamente una fuente de presión situada en el centro de la esfera r_0 y con un ancho de banda de recepción infinito, tiene una respuesta ideal ya que detecta toda la onda esférica emitida. Para un transductor de ultrasonidos real con tamaño y ancho de banda de recepción finitos, un frente de onda esférico que emana de una fuente situada en cualquier posición descentrada fuera del foco acústico, $r \neq r_0$, llegará a la superficie activa del detector en momentos diferentes, distorsionando así tanto la amplitud como la duración de la señal de presión original [14]. La presión detectada por un transductor de cualquier geometría viene definida por la integral de Rayleigh, donde su superficie activa S se divide en un número finito de elementos r_s [15]. Por lo tanto, la presión final detectada $p_{det}(r, t)$ se obtiene de la integral de los campos acústicos detectados en diferentes puntos r_s e instantes de tiempo t en la superficie del transductor

$$p_{det}(r, t) = \int_S p(r_s, t) dS \quad (1)$$

donde $p(r_s, t)$ corresponde a la presión en el elemento de superficie del transductor proveniente de la fuente de presión puntual producida por el láser en r_0 y que obedece la ecuación de ondas fotoacústica [2]. Este proceso se caracteriza mediante la respuesta al impulso espacial (SIR), la cual modela las distorsiones introducidas en la señal detectada debidas a la geometría del detector y a la posición relativa de la fuente con respecto al foco acústico del transductor. Por

tanto, la señal de presión detectada por un transductor real en un punto r del espacio puede escribirse en términos de la SIR como

$$p_{det}(r, t) = p_{\delta}(r_0, t) * h(r, t) \quad (2)$$

siendo $p_{\delta}(r_0, t)$ la señal generada por una fuente de presión puntual en el centro del foco acústico, $h(r, t)$ la SIR del transductor y $*$ el operador de convolución temporal.

2.1.2. Algoritmos implementados

En este estudio se han aplicado y analizado tres algoritmos de compensación de la SIR de un transductor focalizado: *Spatially-Variant Filter* (SVF), *Spatial Matched Filter* (SMF) y *Weighted Back-Projection* (WBP), para los que su rendimiento se ha evaluado en diferentes situaciones simuladas que se aproximen a un entorno realista. Como estos algoritmos no se tratan de algoritmos iterativos y actúan como filtros de retroproyección, su aplicación resulta en tiempos cortos de computación, siendo adecuados para su implementación en sistemas reales.

El algoritmo SVF está basado en la Ec. 2, demostrando que la señal emitida sin distorsionar puede recuperarse para cualquier punto de escaneo r al deconvolucionar la señal detectada con la SIR calibrada para la geometría específica del transductor de ese mismo punto [7], quedando la expresión

$$p_{comp}(r, t) = p_{det}(r, t) * h(r, t)^{-1} \quad (3)$$

siendo $p_{comp}(r, t)$ la señal de presión compensada en el punto r equivalente a la no distorsionada $p_{\delta}(r_0, t)$ del centro del foco del transductor. Para acelerar la ejecución del algoritmo es conveniente obtener la Ec. 3 en el dominio frecuencial, realizando la división de las transformadas de Fourier de la señal detectada y la respuesta al impulso. Como se demostrará más adelante, el inconveniente principal de este método serán las divergencias de la señal compensada que aparecerán para señales muy ruidosas o con baja SNR esperables en entornos experimentales.

El siguiente algoritmo, denominado SMF, se ha utilizado en aplicaciones de imagen por ultrasonidos para corregir distorsiones dependientes del espacio [16]. Para un sistema lineal invariante en el tiempo, se aplica un filtro $SMF(r, t)$ en cada punto del plano imagen r de la siguiente forma

$$p_{comp}(r, t) = p_{det}(r, t) \star SMF(r, t) \quad (4)$$

donde $SMF(r, t)$ es la señal previamente calibrada y \star el operador de correlación cruzada. El valor de dicha correlación será alto cuando la señal detectada se asemeje a

la calibrada, ya que ambas señales poseen una forma de onda con la misma distorsión asociada a su posición respecto del transductor [17]. De este modo, estableciendo un simple umbral, se pueden filtrar las señales de ruido que otorguen un bajo valor de correlación, por lo que este método funciona muy bien como método de detección de si existe o no señal fotoacústica en un píxel, formando así una imagen final binaria. Sin embargo, en la formación de esta imagen, se pierden las diferencias de intensidad entre las señales recibidas y, por tanto, la fidelidad de la imagen.

Existe otro enfoque llamado *Weighted Back-Projection* (WBP) que se ha utilizado ampliamente en algoritmos de reconstrucción de fotoacústica [8]. En este caso, trabaja a nivel de la imagen, en lugar de actuar a nivel de la señal recibida de cada punto, como en los anteriores algoritmos. Este consiste en tomar el valor de cada píxel de la imagen obtenida en calibración de la SIR y calcular la diferencia con el valor de amplitud del píxel central (situado en el foco acústico). Con esto, se construye una matriz de pesos W que modifica y compensa píxel a píxel el decaimiento radial de la amplitud, por lo que a partir de la matriz de imagen I , se obtiene la imagen corregida I' como el producto de los elementos de dichas matrices, siendo

$$I' = W I \quad (5)$$

Por último, se ha implementado un nuevo algoritmo a partir de la combinación adecuada de los dos primeros que denominamos *SVF-SMF-Combination*. El diagrama de flujo que realiza este algoritmo se muestra en la Fig. 1.

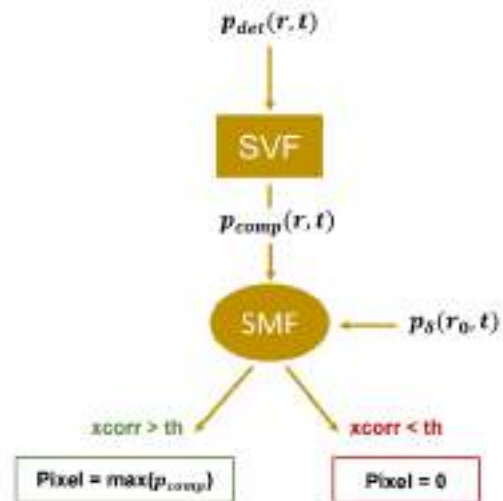


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto. Muestra el proceso de obtención del valor del píxel final. $xcorr$ simboliza el valor de correlación tras el SMF, y th es el umbral establecido.

En primer lugar, se aplica la compensación que proporciona el SVF y se obtiene una imagen compensada, aunque ésta es muy ruidosa en aquellos píxeles donde realmente no hay señal fotoacústica y la deconvolución diverge. A partir de esta imagen se aplica el filtro SMF a todas las señales ya compensadas por el SVF $p_{comp}(r, t)$ empleando la señal modelo sin distorsión $p_{\delta}(r_0, t)$, del centro del transductor, obteniendo así un valor de correlación muy alto en los píxeles donde existe señal fotoacústica. De este modo, el elevado ruido introducido por el SVF en los píxeles donde en realidad no existe señal fotoacústica se elimina de forma muy efectiva mediante umbralización, sin embargo, se mantienen los valores de compensación del SVF en los píxeles en los que sí existe señal fotoacústica, reflejando a su vez la proporcionalidad de intensidad de la señal proporcionada por el SVF. Con este enfoque, se obtiene un método robusto frente al ruido para la compensación de la respuesta al impulso espacial, sin influir en la fidelidad de la información mostrada en la imagen final, lo cual no puede obtenerse mediante la implementación de los algoritmos individualmente.

2.2. Simulaciones de calibración SIR del transductor y evaluación de algoritmos

Para la implementación y evaluación de los algoritmos de compensación descritos, se han realizado simulaciones fotoacústicas realistas en el entorno *k-wave* desarrollado en Matlab. El sensor se ha modelado como una versión a escala reducida de un transductor focalizado con radio de curvatura de 30.25 mm y apertura de 30 mm, y con ancho de banda de recepción entre 2 y 14 MHz a un nivel de 6 dB. Un esquemático del entorno de simulación utilizado se muestra en la Fig. 2.

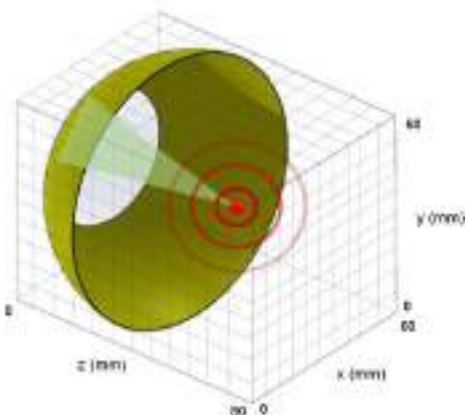


Figura 2. Esquema del entorno de simulación *k-wave* utilizado para la calibración de la SIR, donde se muestran la geometría del transductor, el pulso láser y la fuente acústica.

Este proceso puede dividirse en dos partes. En primer lugar, se realiza una simulación para la calibración de la SIR en un área de imagen de $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Para ello, la señal no distorsionada emitida por una fuente puntual de $20 \mu\text{m}$ situada en el centro del foco acústico $x(r_0, t)$ sirve como entrada del sistema, mientras que las señales de presión $y(r_n, t)$ detectadas en cada posición del barrido r_n son las salidas del sistema, dando lugar a la respuesta al impulso SIR en cada punto, que se calcula como

$$h(r_n, t) = \mathcal{F}^{-1}\{H(r_n, f)\}, \quad \text{siendo } H(r_n, f) = \frac{Y(r_n, f)}{X(r_0, f)} \quad (6)$$

donde $Y(r_n, f)$ y $X(r_0, f)$ son las transformadas de Fourier de las señales temporales $y(r_n, t)$ y $x(r_0, t)$, respectivamente.

Una vez obtenida la SIR para cada punto de escaneo, se realiza una segunda simulación utilizando un patrón de píxeles que emula a un *phantom* de venas del que obtener la imagen fotoacústica y probar así la implementación de los algoritmos de compensación de una imagen más realista. En este caso, se usa una fuente de $20 \mu\text{m}$ de diámetro y una duración de pulso de 100 ns, equivalente a la excitación láser fotoacústica de un caso real típico [18], la cual se escanea a lo largo del mismo plano imagen de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ utilizado en la calibración previa. Una vez obtenidas las señales de presión en cada punto del escaneo, la imagen fotoacústica se forma píxel a píxel tomando el valor máximo de amplitud de la señal o *Maximum Amplitude Projection* (MAP). Los resultados se muestran en escala logarítmica normalizada (dB) para poder visualizar la relación señal-ruido (SNR) directamente de las mismas.

Para obtener resultados de evaluación lo más realistas posible y probar la robustez de la compensación realizada por los algoritmos seleccionados, se han realizado distintas simulaciones. En primer lugar, se ha añadido ruido Gaussiano moderado de $\text{SNR} \approx -20 \text{ dB}$ a cada señal de cada píxel. Además, se han probado en un *phantom* de intensidad homogénea (máscara binaria de píxeles), y también en otro que incluye una variación de nivel de intensidad en gradiente lateral (dirección x de la imagen), para poder comprobar si los algoritmos compensan la influencia de la respuesta del transductor sin alterar la proporcionalidad en intensidad de los píxeles de la imagen. Por último, se ha añadido ruido Gaussiano a cada señal con una $\text{SNR} \approx -10 \text{ dB}$ para emular la adquisición de imagen en entornos experimentales de ruido más elevados.

3. RESULTADOS

3.1. Calibración de la respuesta al impulso espacial del transductor

La implementación de los algoritmos para aumentar el FOV de la imagen se realiza con la respuesta al impulso espacial

del transductor previamente calibrada para un área de imagen de $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Los resultados de la calibración se muestran en la Fig. 3, utilizando la representación MAP correspondiente a la amplitud máxima de la señal detectada por el transductor en cada posición escaneada del plano de la imagen.

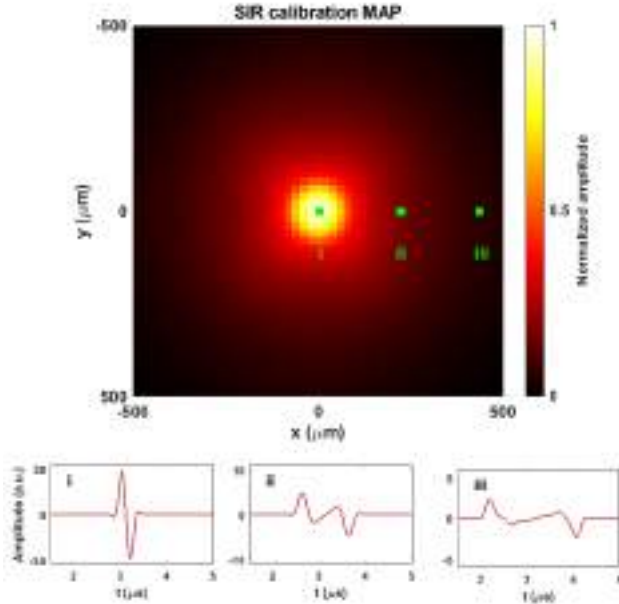


Figura 3. Imagen MAP del campo de sensibilidad obtenido a partir de la simulación de la respuesta al impulso espacial (SIR). En la parte inferior se muestran las señales temporales de presión detectadas en tres píxeles con i) $0 \mu\text{m}$, ii) $200 \mu\text{m}$ y iii) $450 \mu\text{m}$ de desplazamiento lateral.

Se puede observar como el campo de sensibilidad del transductor cae abruptamente cuando la onda fotoacústica proviene de fuentes desplazadas radialmente a partir de aproximadamente $150 \mu\text{m}$ (la anchura a mitad del máximo de la amplitud acústica). En la parte inferior de la Fig. 3 se muestran las señales temporales recibidas para tres posiciones desplazadas lateralmente en x a 0 (i), 200 (ii) y $450 \mu\text{m}$ (iii). Conforme la fuente se aleja del foco acústico, tanto

la amplitud como la forma de onda del pulso de presión detectado se distorsionan en comparación con el pulso fotoacústico sin deformar recibido en el centro del foco acústico.

Una vez se obtienen las señales de la calibración $y(r_n, t)$ y $x(r_0, t)$, las respuestas al impulso espaciales $h(r_n, t)$ para cada posición se calculan según la Ec. 6, obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 4. Se observa como la señal fotoacústica detectada en el centro del foco (a) proporciona una respuesta similar a una Delta de Dirac, pero limitada en frecuencia (d), lo que se debe al filtro Gaussiano aplicado para simular el ancho de banda del transductor. Conforme la fuente fotoacústica se aleja del centro (e), se observa que las deformaciones provocadas en la onda detectada, tanto en la disminución de su amplitud como la separación de los picos de señal en el tiempo, también se reflejan en la respuesta al impulso (h). Esta SIR obtenida para cada posición del FOV se empleará en los algoritmos descritos para recuperar la señal original sin deformar.

3.2. Evaluación de algoritmos basados en la SIR del transductor

En la Fig. 5 se muestran las imágenes obtenidas, sin compensar (a) y tras la aplicación de los tres algoritmos seleccionados SVF (b), SMF (c) y WBP (d) con adición de ruido Gaussiano de $\text{SNR} \approx -20 \text{ dB}$ a las señales temporales. En la imagen sin aplicar la compensación (a), se observa la influencia clara de la caída radial de la sensibilidad de detección del transductor. Debido a que el nivel del ruido no es excesivamente alto, las señales fotoacústicas en los extremos de la imagen son detectables y el patrón de venas se distingue claramente en toda la imagen de $1 \times 1 \text{ mm}^2$. El SVF (b) compensa la caída radial de sensibilidad logrando una respuesta homogénea a lo largo de toda la imagen del patrón. Sin embargo, el nivel de ruido aumenta significativamente, en torno a 10 dB , en aquellos píxeles en los cuales no existe

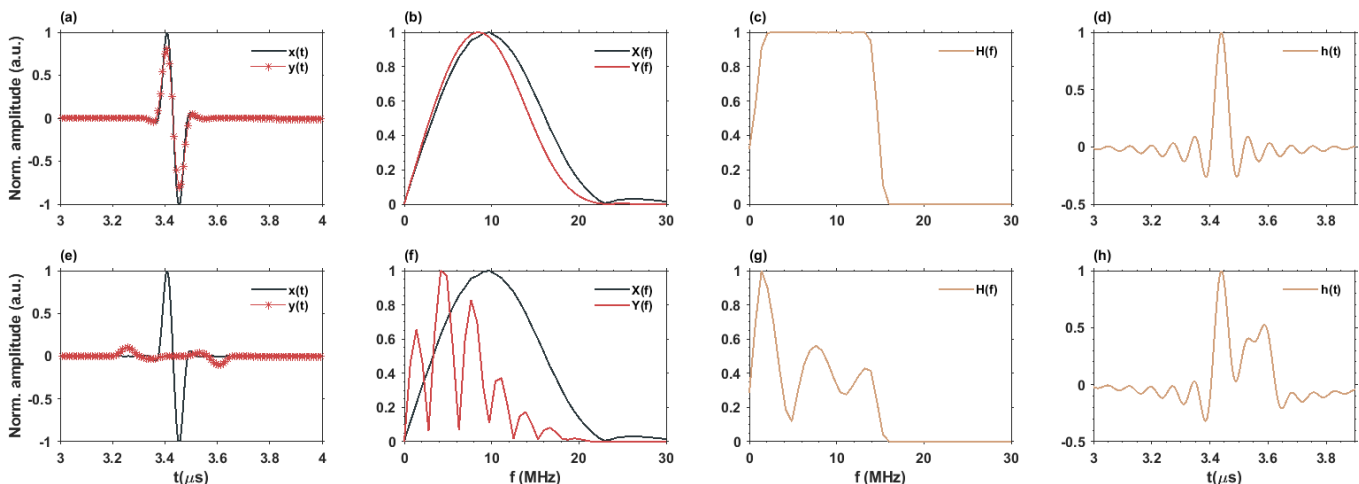


Figura 4. Proceso de cálculo (pasos de izquierda a derecha) de la respuesta al impulso $h(r_n, t)$ para una posición centrada (fila superior) y para una posición con un desplazamiento lateral de $500 \mu\text{m}$ (fila inferior).

señal fotoacústica, debido a la inestabilidad del proceso de deconvolución en este caso, descrito anteriormente. En cuanto al SMF (c), ya que el valor de correlación es muy sensible a la forma de la señal temporal, detecta perfectamente cuando en un píxel existe respuesta fotoacústica y cuando se trata de ruido basal, por lo que, aplicando un umbral a dicho valor de correlación, se obtienen imágenes compensadas en todo el rango aunque binarizadas, y limpia totalmente el ruido de fondo. Por último, el WBP (d) no logra una compensación homogénea debido a su falta de robustez, elevando el ruido en las regiones más alejadas del foco acústico. Esto es debido a que normalmente este algoritmo se utiliza como filtro para eliminar señales cuando estas provienen de fuera del foco, al contrario que en el caso presente.

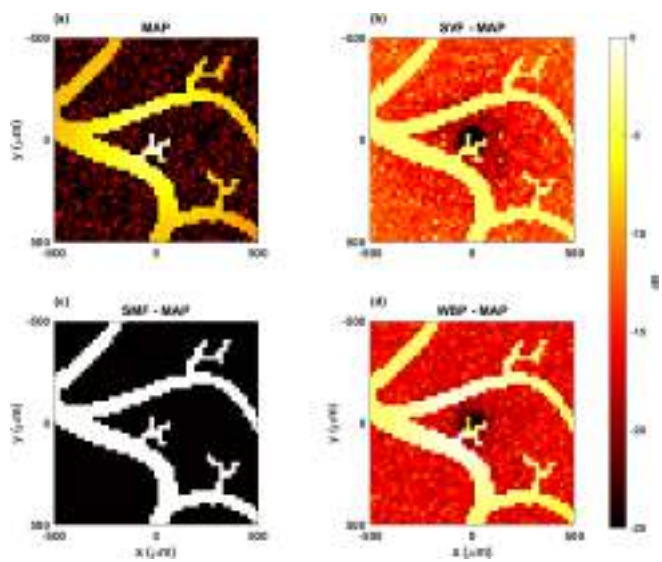


Figura 5. Imágenes MAP con adición de ruido Gaussiano de SNR \approx 20dB a) sin compensación b) compensación utilizando el algoritmo SVF, c) compensación utilizando el algoritmo SVF, y d) compensación utilizando el algoritmo WBP.

En la Fig. 6 se muestran los resultados después de introducir la variación lateral de intensidad en el *phantom* del patrón de venas, y empleando un nivel de ruido similar al caso anterior. Esto simula una respuesta fotoacústica más realista de intensidad no homogénea debido a diferencias de absorción de la energía láser en las sustancias del tejido. En la imagen sin aplicar la compensación (a), se aprecia la combinación de los dos efectos introducidos tanto por la respuesta espacial del transductor focalizado como por el gradiente de intensidad de izquierda a derecha de la imagen. En este escenario, el SVF (b) compensa totalmente la respuesta espacial y conserva la información de intensidad, apreciándose el gradiente en su totalidad, aunque tiene el inconveniente de la considerable reducción de la SNR en casi toda la imagen, exceptuando la zona central del foco acústico. En cuanto al resultado de aplicar el SMF, en la imagen (c) se ve como prácticamente binariza la imagen de un *phantom* que

tiene niveles diferentes de intensidad, lo cual confirma que este algoritmo funciona muy bien como detector de existencia de señal fotoacústica, pero no sirve para representar la información en la imagen de forma proporcional a su intensidad de excitación. Por último, el WBP (d) evidentemente no proporciona un resultado robusto al ruido ni fidedigno, por lo que no servirá como método de compensación de la respuesta espacial del transductor.

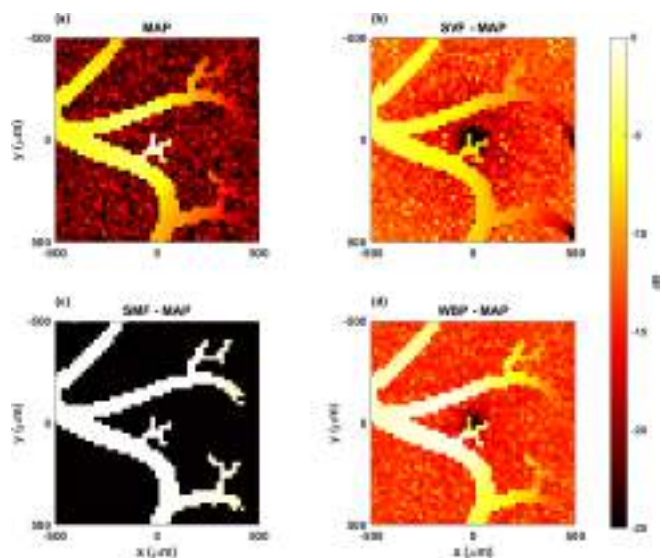


Figura 6. Imágenes MAP con adición de ruido Gaussiano de SNR \approx 20dB para un *phantom* de intensidad no homogénea a) sin compensación b) compensación utilizando el algoritmo SVF, c) compensación utilizando el algoritmo SVF, y d) compensación utilizando el algoritmo WBP.

Una vez analizado el rendimiento de los algoritmos individualmente para distintas situaciones, en la Fig. 7 se muestran los resultados del algoritmo propuesto como combinación efectiva del SVF y el SMF, descrito en la Sección 2.1.2 y representado en el diagrama de la Fig. 1. En esta simulación, se ha probado el algoritmo propuesto en un entorno altamente ruidoso, con un nivel SNR de aproximadamente -10 dB en toda la imagen, utilizando un patrón de intensidad uniforme. Como se puede apreciar, para una imagen totalmente enmascarada por el ruido antes de aplicar la compensación (a), se obtiene una imagen totalmente compensada y limpia (b). En este entorno tan ruidoso, el orden de aplicación de los algoritmos es significativo. Aplicando primero el SVF, se obtiene una imagen compensada radialmente, aumentando su FOV, y reproduce la intensidad de los píxeles con información fotoacústica, aunque como se ha visto anteriormente empeora el nivel de ruido. Así pues, aplicando a continuación el SMF permitirá disminuir este ruido de forma muy efectiva. Esto se explica porque la correlación de la señal modelo sin deformar con las señales compensadas donde existe información

fotoacústica tiene un valor muy alto (cercano a la unidad), mientras que las señales donde hay solamente ruido proporcionan valores de correlación muy bajos que son fácilmente eliminables con un valor umbral apropiado. En el caso contrario, si se aplica en primer lugar el SMF en un entorno con elevado nivel de ruido, la señal de baja amplitud deformada en una posición alejada del foco queda enmascarada entre el ruido, resultando en valores de correlación bajos cuando se compara con el modelo de baja amplitud en ese mismo punto. Esto provoca una pérdida de información debido a que no se alcanza el umbral establecido obteniéndose una imagen con píxeles vacíos donde debería existir información fotoacústica.

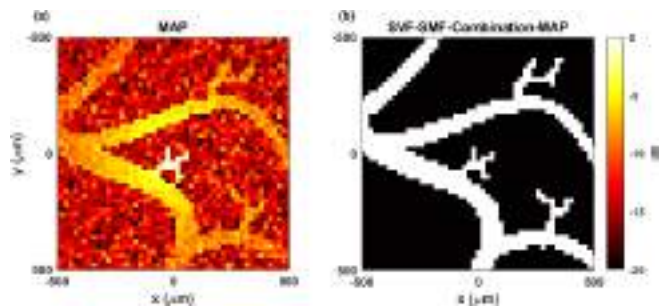


Figura 7. Imágenes MAP con adición de ruido Gaussiano alto de $SNR \approx 10\text{dB}$ a) sin compensación, b) compensación mediante el algoritmo combinado SVF-SMF.

Por último, se ha probado este nuevo algoritmo en un *phantom* no homogéneo con el mismo gradiente de intensidad que en la simulación anterior (Fig. 6). El resultado se muestra en la Fig. 8, donde se aprecia como con esta combinación se obtiene un imagen completamente compensada y fidedigna en el rango de escaneo de $1 \times 1 \text{ mm}^2$, lo cual no puede obtenerse aplicando los algoritmos individualmente.

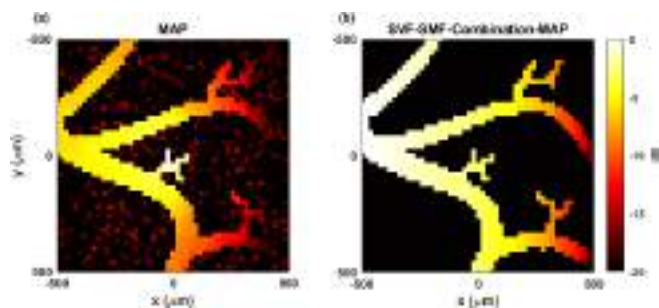


Figura 8. Imágenes MAP con adición de ruido Gaussiano de nivel $SNR \approx 20\text{dB}$ para un *phantom* de intensidad no homogénea a) sin compensación, b) compensación mediante el algoritmo combinado SVF-SMF.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han implementado los algoritmos basados en la respuesta al impulso espacial del transductor *Spatially-Variant Filter* (SVF), *Spatial Matched Filter* (SMF) y

Weighted Back-Projection (WBP) para tratar de ampliar el campo de visión (FOV) de la imagen en un sistema de microscopía fotoacústica con escaneo láser rápido y basado en un transductor focalizado, el cual, está limitado al tamaño del foco acústico. Se ha analizado el rendimiento de estos mediante simulaciones numéricas en *k-Wave* en distintas situaciones con niveles de ruido realistas, obteniendo imágenes fotoacústicas de un *phantom* de venas.

Se ha demostrado que tanto el SVF como el SMF compensan la caída de sensibilidad radial que introduce el transductor de forma efectiva utilizando la respuesta al impulso espacial (SIR) previamente calibrada. Sin embargo, el primer algoritmo aumenta considerablemente el nivel de ruido de fondo, y el segundo, enmascara las diferencias de intensidad que la señal fotoacústica posee en una situación real, produciendo una imagen binaria en los píxeles donde exista o no señal fotoacústica. Finalmente, y como consecuencia de este estudio, se ha propuesto la combinación de ambos algoritmos como una solución muy efectiva para la obtención de imágenes totalmente compensadas, limpias y fidedignas, en cuanto a recoger las variaciones de intensidad proporcionalmente, en un campo de visión, o rango de escaneo láser, de $1 \times 1 \text{ mm}^2$, un orden de magnitud mayor que el tamaño del foco acústico. Esto supone un primer paso en la realización de escaneos láser rápidos de mayor área manteniendo una buena calidad de imagen para transductores focalizados, lo que, en definitiva, reducirá los tiempos de adquisición y aumentará la probabilidad de emplear los sistemas OR-PAM en la práctica clínica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el soporte de financiación a través de los programas de convocatorias competitivas: Programa Investigo INVEST/2022/171 de fondos de la Unión Europea Next Generation EU, Prometeo CIPROM/2021/003 y Equipamiento e Infraestructuras FEDER 2021-22 IDIFEDER/2021/004; y, también, de la Agència Valenciana de la Innovació (AVI) a través de los proyectos INNVA2/2022/11, INNVA1/2022/50.

REFERENCIAS

- [1] P. Beard, "Biomedical photoacoustic imaging," *Interface focus*, vol. 1, no. 4, pp. 602–631, 2011.
- [2] J. Xia, J. Yao, and L. V. Wang, "Photoacoustic tomography: Principles and advances," *Electromagnetic waves* (Cambridge, Mass.), vol. 147, p. 1, 2014.
- [3] J. Yao and L. V. Wang, "Sensitivity of photoacoustic microscopy," *Photoacoustics*, vol. 2, no. 2, pp. 87–101, 2014.

- [4] Y. Yuan, S. Yang, and D. Xing, "Optical-resolution photoacoustic microscopy based on two-dimensional scanning galvanometer," *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 2, 2012.
- [5] Z. Xie, S. Jiao, H. F. Zhang, and C. A. Puliafito, "Laser-scanning optical-resolution photoacoustic microscopy," *Optics letters*, vol. 34, no. 12, pp. 1771–1773, 2009.
- [6] L. Li, C. Yeh, S. Hu, et al., "Fully motorized optical-resolution photoacoustic microscopy," *Optics letters*, vol. 39, no. 7, pp. 2117–2120, 2014.
- [7] T. Lu, Y. Wang, J. Li, J. Prakash, F. Gao, and V. Ntziachristos, "Full-frequency correction of spatial impulse response in back-projection scheme using space-variant filtering for optoacoustic mesoscopy," *Photoacoustics*, vol. 19, p. 100 193, 2020.
- [8] J. Turner, H. Estrada, M. Kneipp, and D. Razansky, "Improved optoacoustic microscopy through three-dimensional spatial impulse response synthetic aperture focusing technique," *Optics letters*, vol. 39, no. 12, pp. 3390–3393, 2014.
- [9] U. A. Hofmann, W. Li, X. L. Dean-Ben, P. Subochev, H. Estrada, and D. Razansky, "Enhancing optoacoustic mesoscopy through calibration-based iterative reconstruction," *Photoacoustics*, vol. 28, p. 100 405, 2022.
- [10] W. Li, U. A. Hofmann, J. Rebling, et al., "Broadband model-based optoacoustic mesoscopy enables deep-tissue imaging beyond the acoustic diffraction limit," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 16, no. 5, p. 2 100 381, 2022.
- [11] X. Luo, J. Xiao, C. Wang, and B. Wang, "Fast correction of "finite aperture effect" in photoacoustic tomography based on spatial impulse response," in *Photonics*, MDPI, vol. 8, 2021, p. 356.
- [12] M. A. Araque Caballero, "Incorporating sensor properties in optoacoustic imaging," Ph.D. dissertation, Technische Universität München, 2013.
- [13] M. Seeger, D. Soliman, J. Aguirre, G. Diot, J. Wierzbowski, and V. Ntziachristos, "Pushing the boundaries of optoacoustic microscopy by total impulse response characterization," *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 2910, 2020.
- [14] M. A. A. Caballero, A. Rosenthal, A. Buehler, D. Razansky, and V. Ntziachristos, "Optoacoustic determination of spatio-temporal responses of ultrasound sensors," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 60, no. 6, pp. 1234–1244, 2013.
- [15] J. A. Jensen, "A new calculation procedure for spatial impulse responses in ultrasound," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 6, pp. 3266–3274, 1999.
- [16] J. A. Jensen and P. Gori, "Spatial filters for focusing ultrasound images," in *2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 01CH37263)*, IEEE, vol. 2, 2001, pp. 1507–1511.
- [17] F. Gao, X. Feng, R. Zhang, S. Liu, and Y. Zheng, "Adaptive photoacoustic sensing using matched filter," *IEEE Sensors Letters*, vol. 1, no. 5, pp. 1–3, 2017.
- [18] J. J. García-Garrigós, A. Cebrecos, J. A. Navarro-Calvo, and F. Camarena, "A fiber coupled laser diode design for reflection mode optical resolution photoacoustic microscopy," *Ultrasonics*, vol. 132, p. 107 008, 2023.

AN APPROACH TO MODELING THE ULTRASONIC SIGNAL RESPONSE OF WAVE PROPAGATION IN A WATER-IMMERSED PLATE

Mounir Tafkirte^{1*}, Adil Hamine¹, Hicham Mesbah¹, Mohamed Ettahiri¹

¹Laboratory of Metrology and Information Processing
Faculty of Science, Ibn Zohr University, B.P. 8106, 80000 Agadir, Morocco

RESUMEN

Este trabajo propone un nuevo enfoque para modelar la señal ultrasónica de incidencia normal a través de una estructura estratificada inmersa en agua. Se estudia la respuesta a la propagación de una onda ultrasónica longitudinal en una estructura estratificada de manera analítica utilizando el método de la matriz de transferencia (TMM), en el cual la capa se establece como un formalismo de cuadrupolo que combina tensiones y velocidades. El método de la matriz de transferencia nos permite determinar el coeficiente de transmisión de la estructura estratificada, y la señal ultrasónica transmitida modelada se representa en el dominio temporal y de frecuencia. El método TMM se utiliza para verificar la existencia de una concordancia similar a los resultados obtenidos experimentalmente para un transductor con una frecuencia central de 5 MHz. La comparación mostró una concordancia perfecta entre los resultados de modelado para las representaciones tiempo-frecuencia de la señal transmitida en las placas de aluminio. El método de simulación numérica establecido en este trabajo puede proponerse como un complemento efectivo a los experimentos y utilizarse para caracterizar materiales estructurales mediante la simulación de respuestas ultrasónicas para diferentes grosores y frecuencias, superando los problemas asociados con la inestabilidad computacional.

ABSTRACT

This work proposes a new approach to modeling the normal incidence ultrasonic signal through a layered structure immersed in water. The response to the propagation of a longitudinal ultrasonic wave in a layered structure is studied analytically using the transfer matrix method (TMM), in which the layer is established as a quadrupole formalism combining stresses and velocities. The transfer matrix method enables us to determine the transmission coefficient

of the layered structure, and the modeled transmitted ultrasound is represented in the time and frequency domain. The TMM method is used to verify the existence of a similar agreement to the results obtained experimentally for a transducer with a center frequency of 5 MHz. The comparison showed perfect agreement between the modeling results for the time-frequency representations of the transmitted signal in the aluminum plates. The numerical simulation method established in this work can be proposed as an effective complement to experiments and used to characterize structural materials by simulating ultrasonic responses for different thicknesses and frequencies, overcoming the problems associated with computational instability.

Palabras Clave— Transfer matrix method, Longitudinal wave, Structure materials, Numerical simulation, Ultrasonic responses.

1. INTRODUCTION

Transfer matrix method (TMM) is a widely used technique in mathematics and physics, applied to systems represented as a sequence of interconnected subsystems using transfer matrices. While it finds extensive use in various fields like optics, acoustics, and electromagnetics, it is important to acknowledge its limitations. In acoustics, the TMM approach, as explored by researchers such as Thomson [1] and Haskell [2], can encounter stability issues for certain cases, particularly as the overall thickness of a layer or the frequency of waves increases. Additionally, the TMM becomes more complex and time-consuming. Thus, it is crucial to consider these limitations while applying the transfer matrix method to ensure accurate and reliable results [3,4]. The purpose of this paper is to contribute a new and accurate model for simulating ultrasonic signals transmitted by layered structures immersed in water at normal incidence, even in the presence of different types of layers, thicknesses,

* **Autor de contacto:** mounir.tafkirte@edu.uiz.ac.ma

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

and frequencies. This model is based on the transfer matrix method (TMM). To address the numerical instability associated with thickness and frequency variations, the transfer matrix elements of the layer structures must be robust, simple, and independent [5].

Analytical calculations are excluded due to the complexity of the structures and propagation of modes, making purely numerical calculations necessary to simulate the control system, ultrasonic transmitter, fluid propagation, bulk or guided mode propagation in the structure, and receiver [6].

In this paper, we present a numerical simulation methodology that analytically studies the response to the propagation of a longitudinal ultrasonic wave in a layered structure using the TMM [7,8]. The layered structure is represented as a quadrupole formalism combining stresses and velocities. By employing the TMM, we determine the transmission coefficient of the layered structure and model the transmitted ultrasound in the both time and frequency domain, as well as assess its feasibility. We verify the agreement between our modeling results and experimental data obtained using a 5 MHz center frequency transducer, demonstrating a perfect match in the time-frequency representations of the transmitted signal in the plates. Additionally, we provide a 3D representation of the transmission coefficients in the (X, f) plane, and (X, t) plane. Through an evaluation of the transmission coefficients as a function of frequency and thickness, we demonstrate the computational stability and robustness of our proposed method across a wide range of frequencies and thicknesses, overcoming issues associated with computational instability. This comprehensive analysis confirms the accuracy and effectiveness of our numerical simulation method, making a valuable contribution to estimating the ultrasonic parameters of solid layers and enhancing the field of ultrasonic nondestructive testing (NDT).

The remainder of the paper is organized as follows: Section 2 presents the mathematical model of the response of an ultrasonic wave in an immersed structural material. Section 4 presents the simulation results of the ultrasonic response of the structures in a time and frequency representation, compares the simulation results with experimental results, demonstrate the computational stability. Finally, Section 5 concludes the paper and discusses future work.

2. THE MODELLING APPROACH

The transfer matrix plays a crucial role in representing the elastic plate and characterizing its performance. The theory and explanation of the proposed model are elaborated and visually represented in Figure 1. The figure presents an elastic layer structure immersed in water, highlighting the incident, reflected, and transmitted wave components.

Figure 2 illustrates the orientation and direction of a longitudinal wave incident on an infinitely long layered structure immersed in a fluid medium. The longitudinal wave

is treated as a plane wave, perpendicular to the excitation surface and propagating along the positive abscissa axis. More precisely, the plane wave is simulated using a sinusoidal function multiplied by the Hanning window, centered at a frequency of 5 MHz (Figure 1).

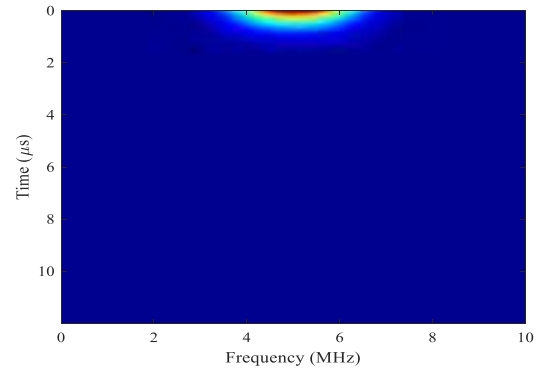


Figure 1. Time-frequency image for plane wave.

The layer is considered as a homogeneous and isotropic structure. Taking into account the solution of the propagation equation, the displacement field in x of a plane wave can be expressed by [9]:

$$u(x, t) = Ue^{i(\omega t - \gamma_l x)} \quad (1)$$

Where U, ω and γ_l are the displacement amplitude, the angular frequency and the wave number of the plane wave.

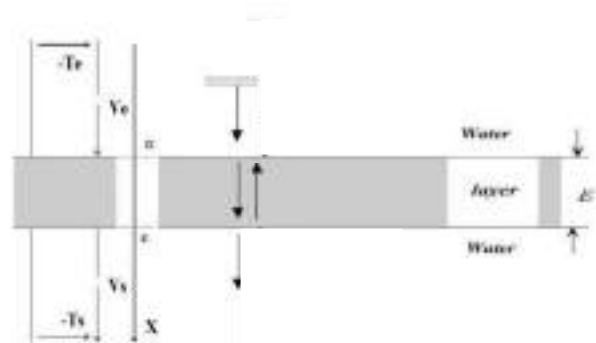


Figure 2. The schematic of the transfer matrix method for the layer structure. V_e : Input velocity, T_e : Input stress, E : Thickness of layer, O : The origin ($X=0$), V_s : Output velocity, T_s : Output stress.

The displacement field in a layer is a combination of two ultrasonic waves (transmitted and reflected) which is written as follows [9]:

$$u(x, t) = Me^{i(\omega t - \gamma_l x)} + Ne^{i(\omega t + \gamma_l x)} \quad (2)$$

M and N are displacement amplitude.

In the presented model, the layer can be represented by a quadrupole. Adopting the quadrupole formalism and knowing M and N, we can derive V_e and $-T_e$ as a function of v_s and $-T_s$ as state variables.

The expression for stress and velocity can be written [9]:

$$v(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

$$T(x, t) = c_l \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

Where c_l is the longitudinal velocity in the layer.

At the interfaces between the fluid and the layer structure, the displacement field, stress and velocity at the interface must be continuous.

The continuity of the stress is:

$$T_e = T(0, t); T_s = T(E, t) \quad (5)$$

The continuity of the velocity is:

$$V_e = V(0, t); V_s = V_s(E, t) \quad (6)$$

The relationship between the state variables on the input and output side of the layer structure can be written in the matrix form [9]:

$$\begin{bmatrix} v_e \\ -T_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ -T_s \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} v_s \\ T_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

Where [T] called transfer matrix, a_{ij} are parameters depending on the thickness and characteristic of elastic layer. The coefficient of transfer matrix has property as follows [9]:

$$a_{11} = a_{22} \quad (8)$$

$$a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} = 1 \quad (9)$$

Transfer Matrix Method (TMM) is indeed a valuable technique for analyzing the ultrasonic signal response of waves in layered structures immersed in a fluid:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_p E) & \frac{i \sin(\gamma_p E)}{Z_p} \\ i Z_p \sin(\gamma_p E) & \cos(\gamma_p E) \end{bmatrix} \quad (10)$$

By utilizing the TMM, one can solve a system of linear equations and determine the transmission coefficient. Considering the transmission coefficient as a function of frequency and elastic property is indeed crucial for accurately predicting the behavior of the transmitted wave [9].

$$R(\omega) = \frac{2 \cdot Z_f}{Z_f \cdot a_{11} + Z_f \cdot Z_f \cdot a_{12} + a_{21} + Z_f \cdot a_{22}} \quad (11)$$

The acoustic impedance of water, denoted as Z_w water. In order to capture all possible echoes and obtain accurate results, long signals are typically employed in the analysis, to ensure that any potential echoes or transmissions from the layered structures in the fluid are adequately captured and considered in the calculations.

3. NUMERICAL RESULT AND VALIDATION

Currently, a number of computer tools are available to support numerical simulations for modeling the ultrasonic signal response. In this study, a simulation of ultrasound wave propagation in layer structures is developed using MATLAB tools.

In our research, we focused on investigating and demonstrating the effectiveness of our proposed numerical simulation approach for different thicknesses of a layer structure immersed in water (Sound velocity = 1480 m/s and Density = 1000 Kg/m³) at selected frequency (5 MHz in our case). To ensure reliable comparisons, we selected aluminum material, with sound velocity of 6380 m/s and density of 2700 Kg/m³ for our experiments as we had access to specific experimental data for aluminum. This enabled us to directly compare the signals generated by our simulations with the corresponding experimental measurements. Significantly, our numerical simulation approach can be extended to analyze layer structures composed of any material, making it versatile and applicable to various scenarios [5,9,10].

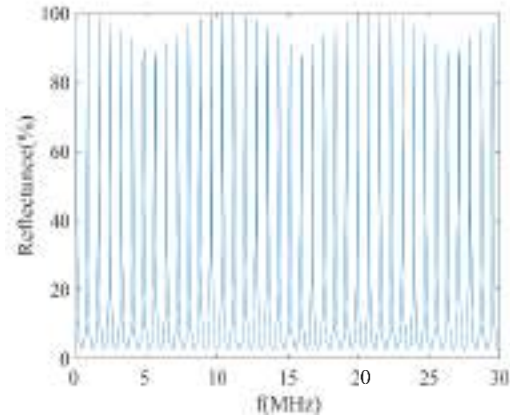


Figure 3. The transmittance of ultrasonic signals through a 3 mm thick Aluminum plate at normal incidence

The figure 3 shows the transmittance of 3 mm thick Aluminum plate. The transmittance maxima that are interconnected to the longitudinal modes propagating in the aluminum plate. the evaluation of the transmission coefficients shown in Figure. 3 show that this proposed method is computationally stable and robust over a wide range of different frequencies, which overcomes problems associated with computational instability.

The availability of experimental data played a crucial role in our study. It served as a critical benchmark against which we evaluated the simulated signals. By comparing the simulated results with the experimental measurements, we validated the accuracy of our numerical simulation approach. This comparison allowed us to assess the reliability of our model and gain confidence in its predictive capabilities.

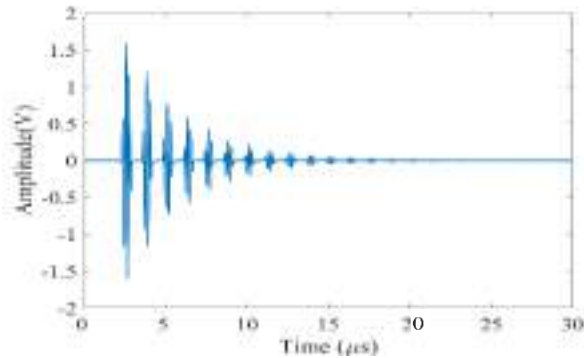


Figure 4. The simulated signal transmitted by 3 mm thick Aluminum plate with 5 MHz of center frequency at normal incidence.

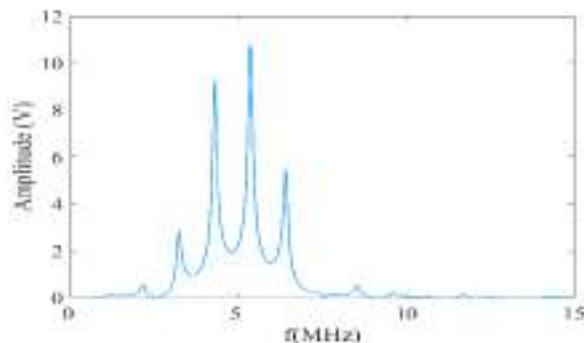


Figure 5. The simulated spectrum of signal transmitted by 3 mm thick Aluminum plate with 5 MHz of center frequency at normal incidence.

we present the results obtained from simulating the transmitted ultrasonic signals through 3 mm thick aluminum plates immersed in water at 5 MHz of central frequency. These results, illustrated in Figure 4, reveal a distinct pattern of regularly spaced echoes in the signal. These echoes correspond to longitudinal waves bouncing back and forth inside the aluminum plate. In the time domain, these echoes are clearly visible as distinct peaks, indicating the presence of multiple reflections occurring within the aluminum plate. The spectrum in figure 5 shows a peak at around 5 MHz, which corresponds to the center frequency of the excitation signal used in the simulation. In addition, there are several smaller

peaks at higher frequencies, indicating the presence of higher harmonics in the signal, which is likely due to the resonance of longitudinal waves inside the plate. The resonance frequency is related to the thickness of the aluminum, as thicker aluminum will have lower resonant frequencies,

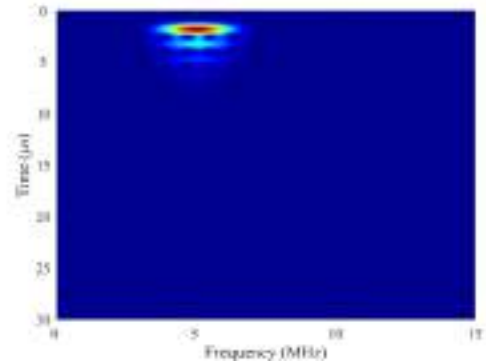


Figure 6. The time-frequency distribution (Spectrogram) of simulated signal transmitted by 3 mm thick Aluminum plate with 5 MHz of center frequency at normal incidence.

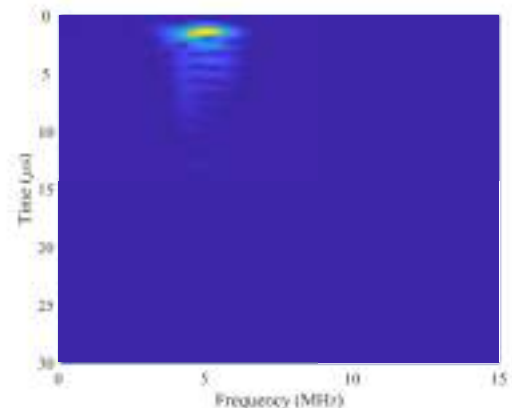


Figure 7. The time-frequency distribution (Spectrogram) of experimental signal transmitted by 3 mm thick aluminum plate with 5 MHz of center frequency at normal incidence.

overall, we obtained the time–frequency image in Figure 6 of the ultrasonic signal response through aluminum immersed in water exhibits a multiple-wave packet of different amplitude, which is localized at a certain time and has a center frequency of 5 MHz. Importantly, our proposed model demonstrates excellent agreement with the experimental results, as demonstrated in the comparison shown in Figure 6 and Figure 7. This confirms the accuracy and reliability of our adopted model in estimating the ultrasonic parameters of the aluminum plate. The agreement between the simulation and experimental results validates the reliability and accuracy of the adopted numerical simulation approach. Our model

effectively estimates the ultrasonic parameters of the aluminum plate, providing valuable insights into its behavior and allowing for the characterization of the material. Furthermore, we provide a 3D representation of the transmission coefficients in the (X, f) plane and (X, t) plan, as depicted in Figure 8. This representation highlights the computational stability and robustness of our proposed method across a wide range of frequencies and thicknesses. Overcoming computational instability issues is crucial in ensuring reliable and accurate simulations. that this proposed method is computationally stable and robust over a wide range of different frequencies and thicknesses, which overcomes problems associated with computational instability.

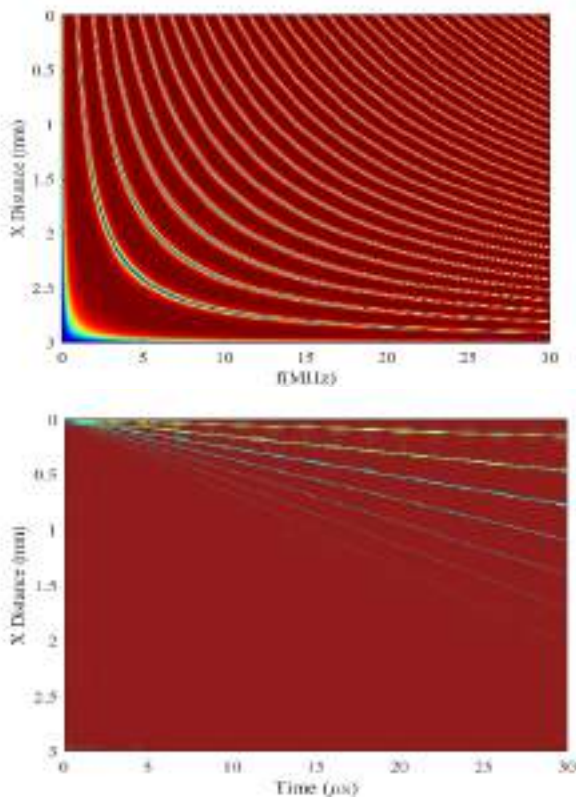


Figure 8. 3D representation of the transmission coefficients in the (X, f) plane and (X, t) plan versus frequency and time plane for an Aluminum plate

4. CONCLUSION

In conclusion, our numerical simulation methodology has successfully demonstrated its effectiveness in studying the ultrasonic response of layer structure immersed in water. The simulation results closely align with the experimental data, providing strong validation for the accuracy of our model in estimating the ultrasonic parameters of the aluminum plate.

Furthermore, the 3D representation of the transmission coefficients showcases the computational stability and reliability of our method across different frequencies and thicknesses. These findings have significant implications for the field of ultrasonic nondestructive evaluation, offering valuable insights and practical applications for researchers and practitioners.

12. REFERENCIAS

- [1] Haskell, N. A. "The dispersion of surface waves on multilayered media." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43(1).
- [2] Thomson, W. T. "Transmission of elastic waves through a stratified solid medium." *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89–93.
- [3] J. Zhang, Y. Cho, J. Kim, A. K. U. Malikov, Y. H. Kim, J. H. Yi, and W. Li, "Non-Destructive Evaluation of Coating Thickness Using Water Immersion Ultrasonic Testing." *Coatings*, 11(11), 2021.
- [4] T. G. Álvarez-Arenas and J. Camacho, "Air-coupled and resonant pulse-echo ultrasonic technique." *Sensors*, 19(10), 2019.
- [5] M. Tafkirte, A. Hamine, H. Mesbah et al., "Time-frequency simulation of ultrasonic longitudinal wave propagation in rocks." *Mater. Today: Proc*, 2023.
- [6] L. Wang and S. I. Rokhlin, "Stable reformulation of transfer matrix method for wave propagation in layered anisotropic media." *Ultrasonics*, 39(6), 413-424, 2001.
- [7] J. T. Wang, F. Jin, and C. H. Zhang, "Reflection and transmission of plane waves at an interface of water/porous sediment with underlying solid substrate." *Ocean Engineering*, 63, 8-16, 2013.
- [8] M.J.S. Lowe, "Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media." *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 42, 525-542, 1995.
- [9] M. Tafkirte and A. Hamine, "A transfer matrix model and application spectral and time-frequency to study an ultrasonic wave backscattered by different plates immersed in water." *Materials Today: Proceedings*, vol. 36, pp. 61–66, 2022.
- [10] Tafkirte, M., Hamine, A., Mesbah, H., Aboudaoud, I., & Décultot, D. (2023). "A novel approach for modeling the ultrasonic signal backscattered in immersed multilayer structures at normal incidence: Time, Frequency, and Velocity dispersion representation." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 198.

Imagen fotoacústica empleando nanopartículas de redes orgánicas covalentes (nCOFs) como agente de contraste

Irene Pi-Martín¹, Carla María Vidaurre Agut², Alejandro Cebrecos¹, Juan J. García-Garrigós¹,
Noé Jiménez¹, Pablo Botella Asunción², Francisco Camarena¹

¹ Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (i3M)

² Instituto de Tecnología Química (ITQ)

Universitat Politècnica de València- CSIC, Camino de Vera S/N, 46022, Valencia, Spain

RESUMEN

La imagen fotoacústica permite obtener imágenes moleculares y funcionales en cualquier medio biológico. Empleando contrastes exógenos (típicamente nanopartículas de oro) se puede mejorar la calidad de las imágenes obtenidas y utilizarlos como marcadores de dianas fisiopatológicas específicas. En este trabajo se ha estudiado la viabilidad de utilizar nanopartículas de redes orgánicas covalentes (nCOFs) como agentes de contraste exógenos para imagen fotoacústica. Para ello, se ha comparado la respuesta de dos tipos de nCOFs (TAPB-PDA y LZU-1) con el estándar actual. Los resultados obtenidos señalan a ambos tipos de nCOFs como agentes de contrastes muy prometedores para imagen fotoacústica debido a su satisfactoria respuesta y su biocompatibilidad. El empleo de nCOFs biocompatibles permitirá obtener imágenes moleculares de alta calidad empleando altas dosis de contraste y minimizando los efectos secundarios.

ABSTRACT

Photoacoustic imaging allows molecular and functional imaging in any biological medium. Using exogenous contrasts (typically gold nanoparticles) can improve the quality of the images obtained and be used as biomarkers for specific pathophysiological targets. In this work we have studied the feasibility of covalent organic frameworks (nCOFs) as exogenous contrast agents for photoacoustic imaging. For this purpose, the response of two types of nCOFs (TAPB-PDA and LZU-1) has been compared with the current standard. The results obtained point both types of nCOFs as very promising contrast agents for photoacoustic imaging due to their satisfactory response and biocompatibility. The use of biocompatible nCOFs will allow obtaining high quality molecular images using high contrast doses and minimising side effects.

Palabras Clave— fotoacústica, agentes de contraste exógenos, biocompatibilidad, redes orgánicas covalentes.

1. INTRODUCCIÓN

La imagen fotoacústica proporciona información funcional y molecular sobre el organismo, que puede utilizarse tanto como herramienta diagnóstica como para el seguimiento del tratamiento [1, 2]. El uso de contrastes externos, como nanopartículas de oro (NPAu) o tintas, puede mejorar el contraste y la profundidad de penetración de las imágenes [3-5]. Estos agentes de contraste exógenos pueden acumularse pasivamente en zonas de interés, por ejemplo, en tumores. Sin embargo, también pueden ser moléculas complejas diseñadas para tener una afinidad activa por dianas muy específicas [2, 6]. El principal inconveniente de las moléculas utilizadas convencionalmente como agentes de contraste exógenos es su acumulación en el organismo. Se asume que el organismo no será capaz de deshacerse del contraste administrado y, por tanto, para minimizar el estrés oxidativo generado por su administración se emplean concentraciones muy bajas [7-10].

En los últimos años, se ha trabajado en el desarrollo de moléculas menos dañinas para el organismo o, al menos, que el propio cuerpo sea capaz de desintegrarlas por completo [11-16]. En concreto, este trabajo se centra en evaluar la viabilidad de las nanopartículas de redes orgánicas covalentes (nCOFs), materiales 100% orgánicos, inocuos para el organismo y biodegradables, como agentes de contraste exógenos. Idealmente, estas estructuras químicamente complejas pueden cargarse con fármacos que se liberan localmente en la zona de iluminación láser o con otro tipo de agentes [11] sintonizables a la longitud de onda deseada, en función de la excitación láser utilizada para obtener la imagen fotoacústica [15].

En este trabajo, nos hemos centrado en evaluar el potencial de los nCOFs LZU-1 [17] y 1,3,5-tris(4-aminofenil)benzo-tereftalaldehído (TAPB-PDA) [18] como agentes de contraste exógenos para tomografía fotoacústica con su estructura original, sin modificarlos ni añadirles ningún cromóforo. Además, se ha utilizado el fluorocromo ATTO532 cargado en nanopartículas de sílice mesoporosa

(MSNs) para utilizarlas, junto con las nanopartículas de oro, como referencia del nivel de respuesta fotoacústica (PA, del acrónimo inglés) adecuado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Montaje experimental

La Fig. 1 muestra un diagrama esquemático del montaje experimental utilizado para obtener la respuesta PA de las nanopartículas. Las muestras objeto de estudio se diluyeron en una disolución tampón PBS (Phosphate Buffered Saline) y se colocaron dentro de cánulas de plástico, paralelas a la sonda receptora, y sumergidas a 25 mm de profundidad en agua desionizada.

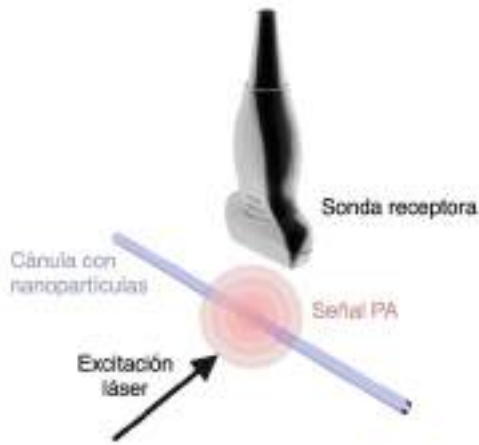


Figura 1. Diagrama del montaje experimental empleado.

El sistema de obtención de imágenes empleado consta de un láser de oscilador paramétrico óptico (OPO) EKSPLA NT350A trabajando a 532 nm, con un haz de diámetro 15 mm, una frecuencia de repetición de pulsos de 10 Hz y duración de 6 ns, sincronizado con el sistema de adquisición Vantage 256TM de Verasonics acoplado a la sonda ultrasónica lineal de de 128 elementos L11-5v.

El sistema implementado es un sistema dual de imagen ultrasónica y fotoacústica. Las imágenes de ultrasonidos proporcionan el posicionamiento de la cánula en el espacio de imagen, y las imágenes fotoacústicas aportan la respuesta PA de las nanopartículas iluminadas por el haz láser.

2.2. Desarrollo experimental

Se han realizado dos estudios experimentales. En primer lugar, se ha evaluado si la amplitud de la respuesta PA de las alternativas orgánicas propuestas es similar a la de referencia. Para ello se ha seleccionado una excitación láser a 532 nm, el estándar de trabajo con NPAu y donde tienen el máximo de

absorción óptica, para así comparar la amplitud de la respuesta PA del oro con los dos nCOFs objeto de estudio (LZU-1 y TAPB-PDA) y con las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) marcadas con el cromóforo ATTO532. En este estudio, todas las muestras utilizadas se diluyeron a 0.1 mg/ml, ya que ésta es la concentración máxima de NPAu que suele utilizarse en ensayos.

En segundo lugar, se ha estudiado cómo crece la señal PA con el aumento de la concentración de LZU-1, TAPB-PDA y MSN + ATTO532. Para este estudio, se utilizó la misma excitación láser de longitud de onda fija a 532 nm, y se midieron las muestras a las siguientes concentraciones: 0.1 mg/ml, 0.5 mg/ml, 1 mg/ml, 2 mg/ml, 3 mg/ml, 4 mg/ml y 5 mg/ml.

2.3. Procesado

Para cuantificar la respuesta fotoacústica de cada muestra, en todos los casos se ha obtenido la imagen ultrasónica en modo B empleado un conformador de retardo y suma, que permite definir el interior de la cánula que contiene las muestras. Posteriormente, sin modificar la posición de la cánula ni la sonda, se adquiere la imagen fotoacústica con la sonda y, posteriormente, se integran las señales recibidas para obtener un único nivel de respuesta. La conformación de la imagen fotoacústica se ha realizado empleando un conformador de retardo y suma en modo recepción.

2.4. Modelo teórico

La presión (p_0) generada por el efecto PA en un punto r , suponiendo un calentamiento impulsivo, es proporcional a la densidad de energía óptica absorbida $H(r)$ y se define por

$$p_0(r) = \Gamma H(r) = \Gamma \mu_a(r) \phi(r; \mu_a, \mu_s, g), \quad (1)$$

donde Γ es el coeficiente de Grüneisen, que es adimensional y depende de las propiedades termodinámicas del medio, ϕ es la fluencia óptica (energía por unidad de superficie), μ_a y μ_s son los coeficientes de absorción y dispersión del medio iluminado y g es su factor de anisotropía.

La fluencia óptica se escribe en función de la ley de Beer-Lambert de absorción óptica a través de un medio como

$$\phi = \phi_0 e^{-\mu l}, \quad (2)$$

donde se considera que $\mu = \mu_a + \mu_s$ es el coeficiente de atenuación, ϕ_0 es la fluencia de la luz incidente y l es el espesor del material a través del cual viaja la luz.

Dadas las Ecs. 1 y 2, la presión generada por el efecto fotoacústico queda como

$$p_0 = \Gamma \mu I_0 e^{-\mu l} \quad (3)$$

El coeficiente de absorción depende directamente de la concentración c , según

$$\mu = \varepsilon c \ln 10, \quad (4)$$

donde ε es el coeficiente de atenuación molar y el factor logarítmico corresponde a sustancias líquidas. Por lo tanto, la expresión teórica de la curva de presión en función de la concentración utilizada para el ajuste de los datos experimentales en la Fig. 3 será de la forma

$$p_0 = a c e^{-bc}, \quad (5)$$

donde $a = \Gamma \phi_0 \varepsilon \ln 10$ y $b = \varepsilon \ln 10 l$ son los parámetros de ajuste.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 2 representa la respuesta fotoacústica obtenida para el control (PBS), las nanopartículas de oro (Au), las nCOFs LZU-1 y TAPB-PDA y las MSN marcadas con el cromóforo ATTO532. Todas las muestras están diluidas sobre PBS a una concentración de 0.1 mg/ml. Se realizaron seis réplicas por muestra. El diagrama de caja y bigotes representa la mediana, representada por la línea horizontal, y los extremos inferior y superior de la caja indican los percentiles 25 y 75; los bigotes se han extendido a los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos. En estas pruebas no se han detectado valores atípicos.

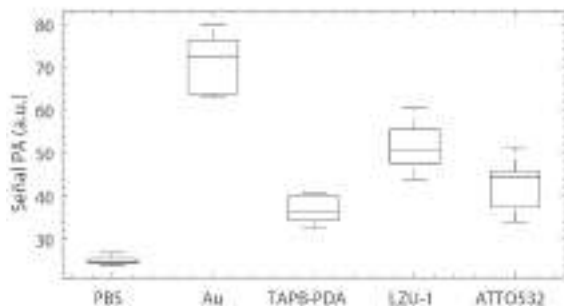


Figura 2. Representación en diagrama de caja y bigotes de la prueba comparativa de nivel de señal PA de nanopartículas de oro (referencia comercial) frente a nCOFs (TAPB-PDA y LZU-1) y MSNs marcadas con el cromóforo ATTO532. La señal PA de control del PBS, medio de disolución de las muestras, determina el nivel PA de fondo. Todas las muestras tienen una concentración de 0.1 mg/ml.

En el gráfico se observa que las muestras orgánicas generan respuestas PA inferiores al estándar comercial (Au), pero significativas. Los resultados obtenidos en este estudio

demonstran que tanto las nanopartículas de red orgánica LZU-1 y TAPB-PDA como las MSNs cromoetiquetas con ATTO532 tienen un gran potencial para su uso como contrastes exógenos en imagen fotoacústica, ya que presentan un nivel de respuesta cercano a la referencia. Cabe resaltar que, dado que las nanopartículas de red orgánica son inocuas para el organismo, existe la posibilidad de administrar dosis de mayores concentraciones del compuesto, aumentando el nivel de respuesta sin perjudicar al futuro paciente, como se demuestra en el siguiente apartado.

La Fig. 3 muestra cómo la respuesta fotoacústica de las nCOFs estudiados y de las MSNs marcadas con ATTO532 aumenta con la concentración. Para cada concentración estudiada se han realizado 24 réplicas. En esta figura se muestran los resultados experimentales obtenidos para cada muestra y el ajuste basado en la aproximación teórica de la señal PA descrita en 2.4. Modelo teórico.

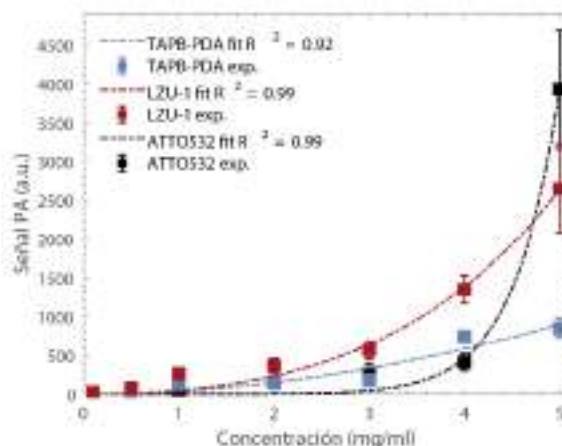


Figura 3. Intensidad PA en función de la concentración de nanopartículas. Los marcadores cuadrados representan la señal media obtenida a partir de las 24 réplicas realizadas para cada muestra, las líneas verticales unidas a ellos representan la barra de error experimental. El ajuste de la expresión teórica (Ec. 5) a los datos experimentales se ha representado con líneas discontinuas.

En primer lugar, se observa que la expresión del modelo teórico describe muy bien el comportamiento observado en los experimentos, teniendo un valor de correlación R superior a 0.9 para los tres casos. Además, se observa una gran ventaja de las redes orgánicas como contraste exógeno para la PA, ya que se demuestra que aumentando su concentración se incrementa la señal generada y, por tanto, el contraste de la imagen obtenida. Dado que las nCOFs son inocuas para el organismo, no es necesario limitarse a la dosis máxima de 0.1 mg/ml comúnmente utilizada con NPAu, pudiendo aumentar la concentración para conseguir niveles de respuesta varios órdenes de magnitud superiores.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la respuesta fotoacústica de diferentes nanopartículas con el fin de estudiar su viabilidad como agentes de contraste exógenos en imagen fotoacústica para aplicaciones médicas. Los resultados muestran que las nCOFS estudiadas presentan un nivel de respuesta similar al máximo generado por nanopartículas oro, i.e., para una longitud de onda (532 nm). Además, dado que los nCOFS son inocuas para el organismo, este estudio podría ampliarse a concentraciones mayores, con el resultado esperable de obtener mejores niveles de contraste en la imagen. Estos resultados señalan a los compuestos orgánicos LZU-1 y TAPB-PDA como excelentes agentes de contraste biocompatibles para imagen fotoacústica, permitiendo obtener imágenes moleculares de alta calidad, sin producir efectos adversos en el organismo.

12. REFERENCIAS

- [1] P. Beard, Biomedical photoacoustic imaging, *Interface focus* 1 (2011) 602–631.
- [2] B. Park, S. Park, J. Kim, C. Kim, Listening to drug delivery and responses via photoacoustic imaging, *Advanced Drug Delivery Reviews* 184 (2022) 114235.
- [3] J. Weber, P. C. Beard, S. E. Bohndiek, Contrast agents for molecular photoacoustic imaging, *Nature methods* 13 (2016) 639–650.
- [4] V. P. Nguyen, W. Qian, Y. Li, B. Liu, M. Aaberg, J. Henry, W. Zhang, X. Wang, Y. M. Paulus, Chainlike gold nanoparticle clusters for multimodal photoacoustic microscopy and optical coherence tomography enhanced molecular imaging, *Nature Communications* 12 (2021) 34.
- [5] C. Xie, X. Zhen, Y. Lyu, K. Pu, Nanoparticle regrowth enhances photoacoustic signals of semiconducting macromolecular probe for in vivo imaging, *Advanced Materials* 29 (2017) 1703693.
- [6] K. Wilson, K. Homan, S. Emelianov, Biomedical photoacoustics beyond thermal expansion using triggered nanodroplet vaporization for contrast-enhanced imaging, *Nature communications* 3 (2012) 618.
- [7] A. Manke, L. Wang, Y. Rojanasakul, et al., Mechanisms of nanoparticle-induced oxidative stress and toxicity, *BioMed research international* 2013 (2013).
- [8] A. Hariri, E. Zhao, A. S. Jeevarathinam, J. Lemaster, J. Zhang, J. V. Jokerst, Molecular imaging of oxidative stress using an led-based photoacoustic imaging system, *Scientific reports* 9 (2019) 11378.
- [9] Y. Pan, A. Leifert, D. Ruau, S. Neuss, J. Bornemann, G. Schmid, W. Brandau, U. Simon, W. JahnDechent, Gold nanoparticles of diameter 1.4 nm trigger necrosis by oxidative stress and mitochondrial damage, *small* 5 (2009) 2067–2076.
- [10] J. J. Li, D. Hartono, C.-N. Ong, B.-H. Bay, L.-Y. L. Yung, Autophagy and oxidative stress associated with gold nanoparticles, *Biomaterials* 31 (2010) 5996–6003.
- [11] Q. Guan, D.-D. Fu, Y.-A. Li, X.-M. Kong, Z.-Y. Wei, W.-Y. Li, S.-J. Zhang, Y.-B. Dong, Bodipy-decorated nanoscale covalent organic frameworks for photodynamic therapy, *IScience* 14 (2019) 180–198.
- [12] D. Wang, Z. Zhang, L. Lin, F. Liu, Y. Wang, Z. Guo, Y. Li, H. Tian, X. Chen, Porphyrin-based covalent organic framework nanoparticles for photoacoustic imaging-guided photodynamic and photothermal combination cancer therapy, *Biomaterials* 223 (2019) 119459.
- [13] Z. Mi, P. Yang, R. Wang, J. Unruangsri, W. Yang, C. Wang, J. Guo, Stable radical cation-containing covalent organic frameworks exhibiting remarkable structure-enhanced photothermal conversion, *Journal of the American Chemical Society* 141 (2019) 14433–14442.
- [14] J. Feng, W.-X. Ren, J.-L. Gao, F. Li, F. Kong, B.J. Yao, Y.-B. Dong, Core-shell-structured covalent-organic framework as a nanoagent for single-laser-induced phototherapy, *ACS Applied Materials & Interfaces* 13 (2021) 17243–17254.
- [15] Y. Zhu, P. Shao, L. Hu, C. Sun, J. Li, X. Feng, B. Wang, Construction of interlayer conjugated links in 2d covalent organic frameworks via topological polymerization, *Journal of the American Chemical Society* 143 (2021) 7897–7902.
- [16] Q. Guan, L.-L. Zhou, W.-Y. Li, Y.-A. Li, Y.-B. Dong, Covalent organic frameworks (cofs) for cancer therapeutics, *Chemistry—A European Journal* 26 (2020) 5583–5591.
- [17] Ding, S. Y., Gao, J., Wang, Q., Zhang, Y., Song, W. G., Su, C. Y., & Wang, W. (2011). Construction of covalent organic framework for catalysis: Pd/COF-LZU1 in Suzuki–Miyaura coupling reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 133(49), 19816–19822.
- [18] Smith, B. J., Overholts, A. C., Hwang, N., & Dichtel, W. R. (2016). Insight into the crystallization of amorphous imine-linked polymer networks to 2D covalent organic frameworks. *Chemical Communications*, 52(18), 3690–3693.

REFLECTORES HELICOIDALES PARA LA FOCALIZACIÓN DE VÓRTICES ACÚSTICOS DE ALTA INTENSIDAD

Noé Jiménez^{1*}, Enrique González-Mateo¹, Francisco Camarena¹

¹Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular, Universitat Politècnica de València - CSIC, Camino de Vera S/N, 46022 València, España

RESUMEN

Los haces de vórtice se utilizan actualmente en muchas aplicaciones emergentes, por ejemplo, atrapamiento de partículas o en ultrasonidos terapéuticos. Sin embargo, los métodos actuales para sintetizar estos haces exóticos no pueden aplicarse para focalizar frentes de onda acústicos intensos en modo de reflexión. En este trabajo, presentamos las ecuaciones de diseño y la validación de varias topologías de reflectores utilizadas para generar haces de vórtice focalizados. Utilizando métodos geométricos, derivamos las superficies paramétricas para reflectores de vórtice helicoelipsoidal para ser utilizados con fuentes electrohidráulicas, y un reflector de vórtice helicoparaboloidal para ser utilizado con fuentes cilíndricas electromagnéticas. Se explora la ganancia de presión, la dimensión focal y la carga topológica de los distintos generadores de vórtices y se relacionan con los parámetros geométricos. Los resultados muestran que los reflectores helicoelipsoidales y helicoparaboloidales generan vórtices focalizados de forma eficiente. Estas superficies pueden aplicarse para manipular frentes de onda con gran amplitud mecánica, como los utilizados en aplicaciones de los ultrasonidos terapéuticos como litotricia para fragmentación de cálculos renales o biliares, histotricia para la ablación mecánica de tejidos blandos, y en aplicaciones de manipulación sin contacto de partículas, burbujas o tejidos.

ABSTRACT

Vortex beams are currently used in many emerging applications, e.g., particle trapping or therapeutic ultrasound. However, current methods to synthesize these exotic beams cannot be applied to focus intense acoustic wavefronts in reflection mode. In this paper, we present the design equations and validation of several reflector topologies used to generate focused vortex beams. Using geometric methods, we derive parametric surfaces for helico-ellipsoidal vortex

reflectors for use with electrohydraulic sources, and a helico-paraboloidal vortex reflector for use with electromagnetic cylindrical sources. The pressure gain, focal dimension and topological charge of the different vortex generators are explored and related to geometrical parameters. The results show that helico-ellipsoidal and helico-paraboloidal reflectors generate focused vortices efficiently. These surfaces can be applied to manipulate wavefronts with large mechanical amplitude, such as those used in therapeutic ultrasound applications such as lithotripsy for fragmentation of kidney or gallstones, histotripsy for mechanical ablation of soft tissues, and in applications of non-contact manipulation of particles, bubbles or tissues.

Palabras Clave— Ultrasonidos, Vórtices, Litotricia.

1. INTRODUCCIÓN

Los haces de vórtices acústicos son frentes de onda mecánicos estructurados que contienen dislocaciones de fase. Estos haces presentan una dependencia del campo del tipo $\exp(il\phi)$, donde ϕ es el ángulo polar y l es la carga topológica del vórtice, es decir, el número de veces que la fase gira 2π en una vuelta polar completa. Debido a la dislocación de la fase en el eje, las ondas interfieren allí destructivamente y se observa una intensidad en forma de anillo. Como resultado, estos haces transportan, además de momento lineal, momento angular [1].

La exótica estructura de campo que proporcionan los vórtices acústicos ha desencadenado numerosas aplicaciones prácticas. Entre ellas se encuentran las pinzas acústicas de un solo haz para atrapar y manipular partículas, en las que el tamaño de la trampa acústica puede ajustarse utilizando la carga topológica [2], [3], y la rotación inducida de objetos levitados puede controlarse mediante el signo de la carga topológica [4]. Otra aplicación de los vórtices acústicos es la

* Autor de contacto: nojigon@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

codificación robusta y rápida de información para comunicaciones submarinas, donde la información puede codificarse utilizando la carga topológica del vórtice [5]. Dado que las ondas ultrasónicas pueden penetrar todo el cuerpo humano, los vórtices ultrasónicos son de gran interés para las aplicaciones biomédicas de ultrasonidos. Se ha demostrado que es posible atrapar partículas sólidas a escala milimétrica, lo que permite técnicas como la manipulación no invasiva de cálculos renales y la propulsión/posicionamiento de fragmentos dentro del cuerpo humano [6]. A escala microscópica, pueden utilizarse trampas acústicas miniaturizadas para atrapar y manipular células individuales [7]. Estos dispositivos utilizan ultrasonidos de alta frecuencia (>40 MHz) y, por tanto, su penetración está restringida a varios milímetros; sin embargo, han encontrado aplicación directa para microscopios de atrapamiento celular. Mediante la sintonización del campo acústico, se ha demostrado la creación de múltiples patrones celulares, lo que permite aplicaciones como la bioimpresión sin contacto de organoides tridimensionales [8]. Por último, es posible atrapar burbujas con un haz de vórtice y emplear el campo acústico para colapsarlas y liberar su carga interna [9], o inducir torques en el cuerpo humano para aplicaciones de elastografía [10].

Existen muchos métodos para sintetizar haces de vórtices acústicos. En primer lugar, se pueden utilizar sistemas de matrices de fase para sintonizar electrónicamente la fase de la señal utilizada para accionar un transductor piezoeléctrico multielemento [11]. De este modo, estos sistemas pueden generar un vórtice y presentar cierto grado de dirección focal. Sin embargo, el rango de dirección de los sistemas ultrasónicos de alta intensidad es limitado, principalmente porque están compuestos por elementos piezoeléctricos de gran superficie que cubren un área extensa, de varios centímetros. Por lo tanto, aparecen rejillas de difracción cuando los elementos están separados más de una longitud de onda. Se han propuesto fuentes helicoidales basadas en materiales piezoeléctricos flexibles para generar haces de vórtice de foco fijo [11]–[13]. De este modo, las superficies helicoidales planas, cónicas o enfocadas introducen una diferencia de trayectoria en función del ángulo polar. El efecto fotoacústico también puede utilizarse para generar haces de vórtice acústicos iluminando un absorbente de luz helicoidal con un haz láser pulsado [14].

Otros enfoques se basan en lentes que modulan el frente de onda transmitido introduciendo una dislocación de fase. En primer lugar, existen lentes basadas en la refracción, como las placas de fase [15], los axicones y fraxicones espirales [16] o los hologramas acústicos [17], que pueden generar un haz de vórtice. Otro tipo de lentes acústicas son las basadas en la difracción en una placa de zona, como la familia de rejillas binarias con simetría quiral, que incluye las rejillas espirales

de Arquímedes [18], las rejillas espirales de Fresnel [19] o las rejillas de horquilla. Las resonancias locales pueden modular un frente de onda transmitido y, si se sintonizan, pueden generar un haz de vórtice. Entre ellas se encuentran las lentes basadas en metamateriales [20], [21], los caminos en espiral espaciales [22], las estructuras laberínticas [23] o antenas agujereadas [24]. Sin embargo, todos estos métodos introducen cierta atenuación en el frente de onda transmitido, lo que no es deseable para aplicaciones de ultrasonidos de alta intensidad. Además, la mayoría de estos sistemas sólo funcionan para una banda estrecha de frecuencias y, por tanto, no son convenientes para la generación de vórtices pulsados.

De hecho, las técnicas más exigentes de amplitud de presión máxima para ultrasonidos terapéuticos se basan en la combinación de una fuente de sonido intensa y un reflector acústico para enfocar el frente de onda mecánico hacia el punto focal deseado. Aunque pueden utilizarse materiales piezoeléctricos para algunas aplicaciones, las fuentes de sonido más intensas se basan en sistemas electrohidráulicos o electrodinámicos. En los sistemas electrohidráulicos, una bujía se sitúa en uno de los focos de un reflector elipsoidal y, al accionarla con un pulso eléctrico intenso, genera un frente de onda esférico pulsado que se enfoca en el segundo foco del elipsoide. Las fuentes electrodinámicas pueden construirse utilizando una bobina cilíndrica en expansión. Al conducirla con un pulso de corriente intenso, la fuente genera un frente de onda cilíndrico que se enfoca en el foco de un reflector paraboloidal. Estos sistemas están en la base de la litotricia extracorpórea por ondas de choque (ESWL) [25], que se utiliza ampliamente en las clínicas para la comunicación de cálculos y es el estándar actual en la fragmentación de cálculos renales [26]. Sin embargo, las intensas ondas de choque pueden dañar los tejidos blandos sanos produciendo complicaciones como hemorragias, infecciones, úlceras o dolor. Por lo tanto, sería deseable utilizar ondas mecánicas de menor amplitud. Aunque los haces de vórtices que contienen dislocaciones de fase pueden inducir fuerzas de rotación en partículas sólidas, aún se desconoce si los haces de vórtices pueden potenciar la comunicación entre cálculos, por ejemplo, mejorando la conversión de modos y la tensión de cizallamiento en el interior de los cálculos. De hecho, faltan sistemas para generar pulsos acústicos de vórtice de amplitud extrema (>40 MPa).

En este trabajo presentamos dos reflectores acústicos con simetría quiral para generar vórtices acústicos focalizados de gran amplitud. El primer sistema es una superficie helico-elipsoidal, donde se utiliza una fuente puntual para generar un frente de onda esférico y el reflector de simetría quiral genera un haz de vórtices focalizado. El segundo sistema es una superficie helico-paraboloidal, en la que se utiliza una fuente cilíndrica para generar un frente de onda cilíndrico

divergente y, a continuación, de forma análoga, el reflector helicoidal genera un haz de vórtice focalizado en el punto focal del sistema.

2. DISEÑO DE LOS REFLECTORES

Para generar un haz de vórtice focalizado, las superficies reflectantes se diseñan para que cumplan dos condiciones. En primer lugar, las superficies deben introducir una dislocación de fase en el campo reflejado en el eje de simetría quiral del dispositivo. En segundo lugar, las superficies deben enfocar el campo incidente hacia el punto focal del sistema.

Para lograr la primera condición, la superficie debe introducir un retardo temporal relativo en las ondas reflejadas, y este retardo es proporcional al ángulo polar y a la carga topológica, $\Delta t(\theta) = l\theta / \omega_0$, donde ω_0 es la frecuencia de diseño, l es la carga topológica y θ es el ángulo polar. Como la trayectoria recorrida viene dada por $\Delta t(\theta)c_0$, por lo tanto, la diferencia de trayectoria es

$$\Delta L(\theta) = \Delta t(\theta)c_0 = \frac{l\lambda_0\theta}{2\pi}, \quad (1)$$

donde $\lambda_0 = 2\pi c_0 / \omega_0$ es la longitud de onda a la frecuencia de diseño y c_0 es la velocidad del sonido. Por lo tanto, la geometría de la superficie debe presentar una simetría quiral, adoptando la forma de una superficie helicoidal. Obsérvese que la forma helicoidal concreta depende de la fuente; a continuación, consideramos dos tipos, fuentes puntuales y cilíndricas.

2.1. Reflector Helico elipsoidal

El primer reflector utiliza una única fuente puntual, por ejemplo, un generador de chispas electrohidráulico. Si definimos una superficie reflectante elipsoidal oblonga con focos F_1 y F_2 , y la fuente puntual está situada F_1 , el campo reflejado presenta un punto focal en F_2 , como se muestra en la Fig. 1. En este caso, introduciremos una diferencia de fase en el foco estableciendo una diferencia de trayectoria a lo largo de la coordenada polar según la Ec. (1). Por lo tanto, la superficie ya no es un elipsoide ideal, sino una superficie helicoidal dada por

$$\frac{x^2}{b^2(\theta)} + \frac{y^2}{b^2(\theta)} + \frac{z^2}{a^2(\theta)} = 0, \quad (2)$$

donde $a = a(\theta)$ y $b = b(\theta)$ son los semiejes menor y mayor, y x, y, z las coordenadas cartesianas. Si definimos a_0 como el mayor del eje menor del reflector helicoidal-elipsoidal, $a(\theta) = 2a_0$ para $\theta = 0$.

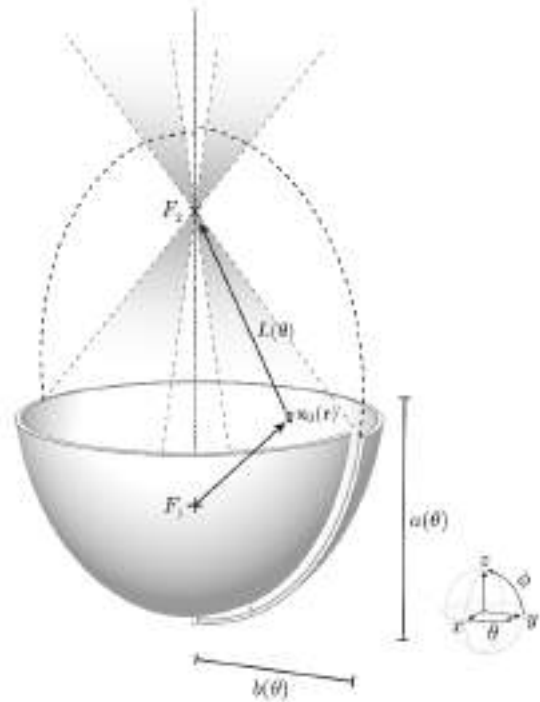


Figura 1. Reflector helicoidal-elipsoidal.

Por tanto, añadiremos una distancia $\Delta L(\theta)$ a la trayectoria recorrida en función del ángulo polar, y finalmente el parámetro $a(\theta)$ cumple

$$a(\theta) = \frac{2a_0 - l\lambda_0\theta / 2\pi}{2}. \quad (3)$$

Por otro lado, el semieje mayor de la superficie helicoidal pasa a ser también función del acimut,

$$b(\theta) = \sqrt{a(\theta)^2 - F_2^2}, \quad (4)$$

asegurando que todas las ondas generadas por la fuente puntual y reflejadas en la superficie se concentran en el punto F_2 .

2.2. Reflector Helico-paraboloidal

El segundo reflector está diseñado para utilizar una fuente cilíndrica, como las utilizadas en los generadores electrodinámicos. El perfil de la superficie adopta la forma de una parábola, como se muestra en la Fig. 2.

Suponiendo que el frente de onda cilíndrico es plano a lo largo de la coordenada z , la superficie refleja las ondas en el vértice de la parábola.

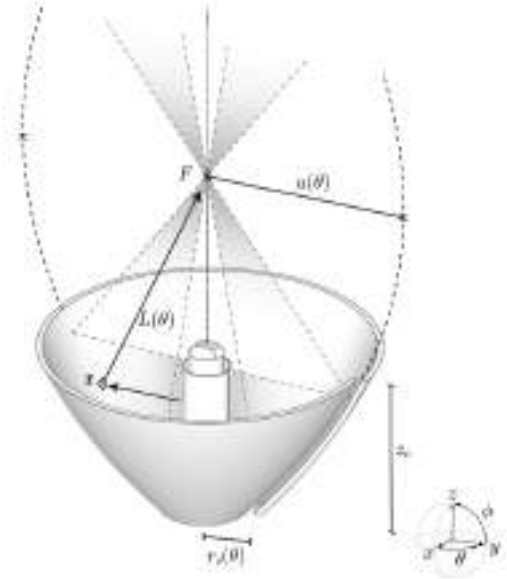


Figura 2. Reflector helicoparaboloidal.

Por lo tanto, en coordenadas cilíndricas, podemos definir una superficie con un perfil parabólico como

$$r(\theta, z) = a(\theta)(z - F)^2 - \frac{1}{4a(\theta)}, \quad (5)$$

donde F es el foco del sistema en la dirección del eje, y $a(\theta)$ es un parámetro geométrico. Para enfocar las ondas en el punto $\mathbf{r}(\theta, r, z) = (0, 0, F)$, el vértice de cada perfil parabólico debe situarse en el punto

$$\mathbf{r}(\theta, r, z) = (0, -1 / 4a(\theta), F). \quad (6)$$

En la parte inferior del reflector, $z_0 = 0$, podemos fijar una apertura radial máxima de R_0 . Entonces, teniendo en cuenta la diferencia de trayectoria dada por la Ec. (1), la coordenada radial debe cumplir

$$r_0(\theta) = R_0 - m' \frac{l\lambda_0 \theta}{2\pi}, \quad (7)$$

donde, por consideraciones geométricas, la constante m' viene dada por

$$m' = \frac{1}{1 + R_0 / \sqrt{F^2 + R_0^2}}, \quad (8)$$

y, finalmente, el parámetro $a(\theta)$ toma la forma

$$a(\theta) = \frac{r_0(\theta) - \sqrt{F^2 - 2Fz_0 + r_0(\theta)^2 + z_0^2}}{2(F^2 - 2Fz_0 + z_0^2)}. \quad (9)$$

Por tanto, fijando la apertura R_m , la focal F , la frecuencia de diseño ω_0 y la carga topológica l , el reflector viene dado por la Ec. (5).

3. RESULTADOS

Los resultados del campo acústico reflejado por las estructuras helicoparaboloidales, calculado empleando las integrales de Rayleigh-Sommerfeld, se muestran en las Figs. 3-4. Se puede observar como las estructuras concentran el campo reflejado en el punto focal, acorde al diseño de esta (Fig. 3).

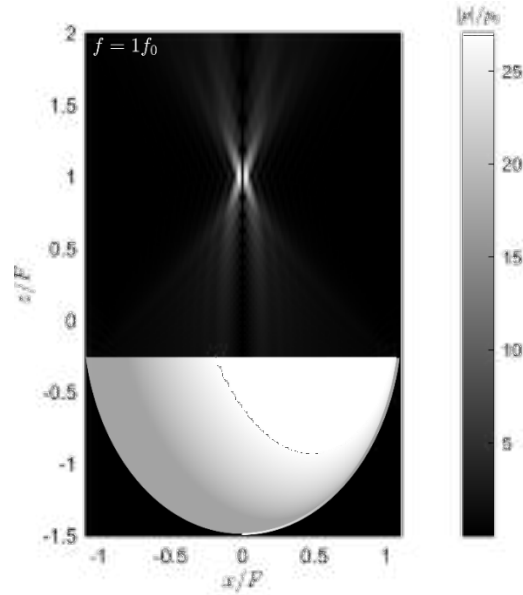


Figura 3. Campo acústico en el plano x-z a la frecuencia de diseño para el reflector helicoparaboloidal.

En el plano transversal, Fig. 4, la magnitud del campo muestra una estructura toroidal, donde esta localiza una dislocación de fase. Debido a que las ondas interfieren destructivamente en ese punto, el campo es nulo. A su alrededor, la estructura tipo toroidal muestra un incremento del campo con una ganancia de 25 para una frecuencia de 200 kHz, una apertura de 15 cm y una focal de 20 cm.

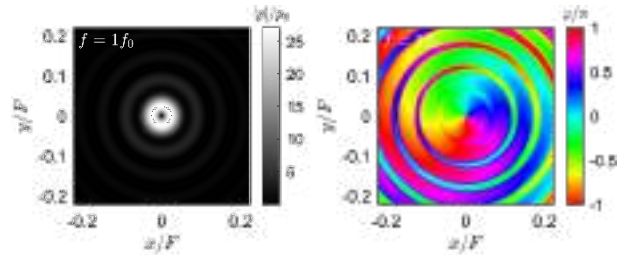


Figura 4. Magnitud y fase del campo acústico en el plano x-y a la frecuencia de diseño para el reflector helicoparaboloidal.

Resultados análogos se muestran en el caso del reflector helicoparaboloidal. El campo se concentra alrededor del punto focal, no se observan aberraciones focales, y el análisis de la fase en el plano transversal indica que la carga topológica de los vórtices producidos es acorde al diseño, en este caso, $l = 1$, es decir, la fase rota un total de $2\pi l$ radianes (1 salto de fase) al dar una vuelta en la coordenada polar.

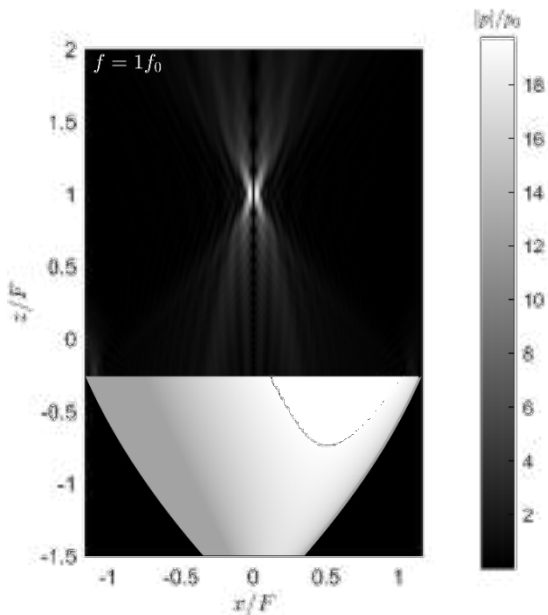


Figura 5. Campo acústico en el plano x-z a la frecuencia de diseño para el reflector helicoparaboloidal.

A otras frecuencias, diferentes a la de diseño, la situación no es exactamente la misma. Para frecuencia muy inferiores a la de diseño, no se observa la generación de vórtice, pues la discontinuidad espacial que produce la superficie helicoidal es fija, y por tanto también lo es la diferencia de caminos, ΔL . Sin embargo, la diferencia de fase que produce esta diferencia de caminos es proporcional a la frecuencia. De esta manera, a frecuencias muy bajas el reflector concentra el campo en el punto focal sin generar una dislocación de fase. Por el contrario, a frecuencias superiores, la diferencia de fase es mayor, y por tanto se genera una dislocación de carga topológica $l = \omega / \omega_0$. Por ejemplo, al doble de la frecuencia de diseño, la carga topológica observada para estos reflectores es $l = 2$.

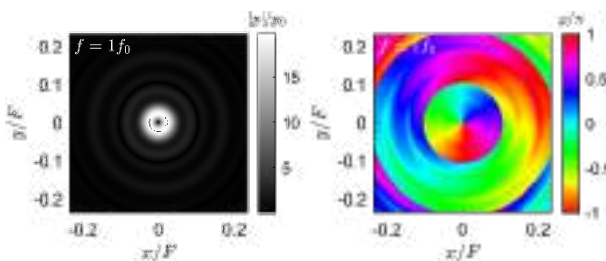


Figura 6. Campo acústico en el plano x-z a la frecuencia de diseño para el reflector helicoparaboloidal.

A frecuencias incommensurables, es decir, para frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia de diseño, observamos que se producen vórtices de carga topológica fraccional sobre el eje. Este aspecto es importante puesto que aparecen para señales impulsivas.

Debido a que la difracción del haz es inversamente proporcional a la frecuencia, la ganancia del sistema depende de la frecuencia, aumentando con la misma. La Figura 7 muestra la ganancia de ambos sistemas, donde observamos que la ganancia efectivamente aumenta con la frecuencia. Debido a que un haz de vórtice es efectivamente un haz defocalizado (un anillo), donde la energía se concentra en un área mayor que en un transductor focalizado común, la ganancia de los reflectores es menor que en los sistemas no helicoidales. Además, vemos como para frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia de diseño, la ganancia es inferior que a frecuencias cercanas. Ello es debido a que justo a esas frecuencias el haz se defocaliza más eficazmente puesto que la dislocación de fase es ideal. Ello indica que el diseño de los reflectores es geoméricamente perfecto. Comparando la ganancia de estos reflectores con la ganancia de un transductor cuya superficie tenga focalización esférica pero helicoidal, observamos que todos estos sistemas presentan un comportamiento similar, con ganancias iguales por debajo de la frecuencia de diseño, y con un comportamiento oscilante muy parecido en alta frecuencia.

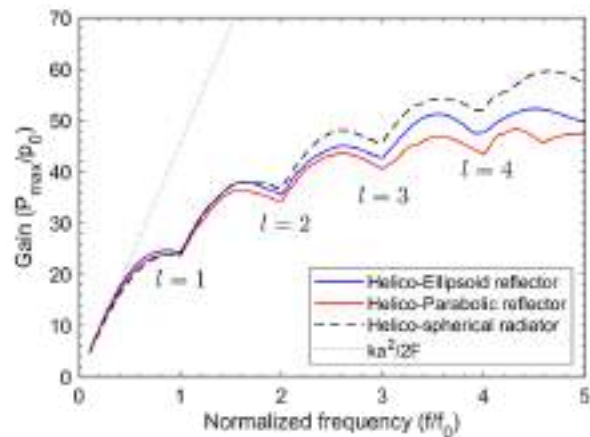


Figura 7. Ganancia del Sistema helicoparaboloidal, helicoidellipsoidal y un transductor focalizado helicoidal.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño y validación analítica de los reflectores helicoidales. Se han desarrollado las ecuaciones de diseño, geoméricamente exactas para dos casos de interés: fuentes monopulares, que resulta en un reflector helicoidal elipsoidal, y para fuentes cilíndricas, lo que resulta en un reflector helicoparaboloidal.

Los parámetros de focalización y la carga topológica del vórtice son totalmente sintonizables modificando el diseño del reflector. Los resultados muestran que vórtices con carga topológica entera emergen en enteros de la frecuencia de diseño, mientras que vórtices de carga topológica fraccional se observan a otras frecuencias.

Es importante señalar que los vórtices acústicos pueden generarse mediante lentes, pero estos sistemas introducen atenuación. Además, usualmente son sistemas muy cromáticos. Por el contrario, los reflectores pueden utilizarse para generar vórtices con señales impulsivas y de gran amplitud, que pueden ser muy eficaces para aplicaciones como litotricia, histotricia y/o manipulación de partículas y tejidos en los que se requiere emplear una fuente de alta intensidad.

REFERENCIAS

- [1] K. Volke-Sepúlveda, A. O. Santillán, and R. R. Boullosa, "Transfer of angular momentum to matter from acoustical vortices in free space," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 2, p. 24302, 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.024302.
- [2] D. Baresch, J.-L. Thomas, and R. Marchiano, "Observation of a single-beam gradient force acoustical trap for elastic particles: acoustical tweezers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 2, p. 24301, 2016.
- [3] A. Marzo, S. A. Seah, B. W. Drinkwater, D. R. Sahoo, B. Long, and S. Subramanian, "Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects," *Nat. Commun.*, vol. 6, p. 8661, 2015.
- [4] K. D. Skeldon, C. Wilson, M. Edgar, and M. J. Padgett, "An acoustic spanner and its associated rotational Doppler shift," *New J. Phys.*, vol. 10, no. 1, p. 13018, 2008, doi: 10.1088/1367-2630/10/1/013018.
- [5] C. Shi, M. Dubois, Y. Wang, X. Zhang, and P. Sheng, "High-speed acoustic communication by multiplexing orbital angular momentum," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 114, no. 28, pp. 7250–7253, 2017, doi: 10.1073/pnas.1704450114.
- [6] M. A. Ghanem *et al.*, "Noninvasive acoustic manipulation of objects in a living body," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2020, doi: 10.1073/pnas.2001779117.
- [7] M. Baudoin *et al.*, "Cell selective manipulation with single beam acoustical tweezers," *Nat. Commun.* 2020 111, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-18000-y.
- [8] Z. Ma *et al.*, "Acoustic Holographic Cell Patterning in a Biocompatible Hydrogel," *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 4, 2020, doi: 10.1002/adma.201904181.
- [9] D. Baresch and V. Garbin, "Acoustic trapping of microbubbles in complex environments and controlled payload release," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2020, doi: 10.1073/pnas.2003569117.
- [10] N. Jimenez, J. M. Benlloch, and F. Camarena, "A new elastographic technique using acoustic vortices," in *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Sep. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/IUS46767.2020.9251417.
- [11] B. T. Hefner and P. L. Marston, "An acoustical helicoidal wave transducer with applications for the alignment of ultrasonic and underwater systems," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, no. 6, pp. 3313–3316, 1999, doi: 10.1121/1.428184.
- [12] J. L. Ealo, J. C. Prieto, and F. Seco, "Airborne ultrasonic vortex generation using flexible ferroelectrets," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 58, no. 8, pp. 1651–1657, 2011, doi: 10.1109/TUFFC.2011.1992.
- [13] N. Jiménez, J. Ealo, R. D. Muelas-Hurtado, A. Duclos, and V. Romero-García, "Subwavelength Acoustic Vortex Beams Using Self-Demodulation," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 15, no. 5, 2021, doi: 10.1103/PhysRevApplied.15.054027.
- [14] S. Gspan, A. Meyer, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, "Optoacoustic generation of a helicoidal ultrasonic beam," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 3, pp. 1142–1146, Mar. 2004, doi: 10.1121/1.1643367.
- [15] M. E. Terzi, S. A. Tsysar, P. V Yuldashev, M. M. Karzova, and O. A. Sapozhnikov, "Generation of a vortex ultrasonic beam with a phase plate with an angular dependence of the thickness," *Moscow Univ. Phys. Bull.*, vol. 72, no. 1, pp. 61–67, 2017.
- [16] S. Jiménez-Gambín, N. Jiménez, J. M. Benlloch, and F. Camarena, "Generating Bessel beams with broad depth-of-field by using phase-only acoustic holograms," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-56369-z.
- [17] S. Jiménez-Gambín, N. Jiménez, and F. Camarena, "Transcranial Focusing of Ultrasonic Vortices by Acoustic Holograms," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 14, no. 5, p. 54070, 2020, doi: 10.1103/PhysRevApplied.14.054070.
- [18] N. Jiménez, R. Picó, V. Sánchez-Morcillo, V. Romero-García, L. M. García-Raffi, and K. Staliunas, "Formation of high-order acoustic Bessel beams by spiral diffraction gratings," *Phys. Rev. E*, vol. 94, no. 5, Nov. 2016, doi: 10.1103/PhysRevE.94.053004.
- [19] N. Jiménez, V. Romero-García, L. M. García-Raffi, F. Camarena, and K. Staliunas, "Sharp acoustic vortex focusing by Fresnel-spiral zone plates," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 112, no. 20, p. 204101, May 2018, doi: 10.1063/1.5029424.
- [20] L. Ye *et al.*, "Making sound vortices by metasurfaces," *AIP Adv.*, vol. 6, no. 8, p. 85007, 2016, doi: 10.1063/1.4961062.
- [21] X. Jiang, Y. Li, B. Liang, J. C. Cheng, and L. Zhang, "Convert Acoustic Resonances to Orbital Angular Momentum," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, no. 3, Jul. 2016, doi: 10.1103/PHYSREVLETT.117.034301.
- [22] H. Esfahlani, H. Lissek, and J. R. Mosig, "Generation of acoustic helical wavefronts using metasurfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 95, no. 2, p. 24312, 2017, doi: 10.1103/PhysRevB.95.024312.
- [23] A. Marzo, A. Ghobrial, L. Cox, M. Caleap, A. Croxford, and B. W. Drinkwater, "Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, no. 1, p. 14102, 2017, doi: 10.1063/1.4972407.
- [24] C. J. Naify, C. A. Rohde, T. P. Martin, M. Nicholas, M. D. Guild, and G. J. Orris, "Generation of topologically diverse acoustic vortex beams using a compact metamaterial aperture," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 22, p. 223503, 2016, doi: 10.1063/1.4953075.
- [25] C. Chaussy and E. Schmiedt, "Extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) for kidney stones. An alternative to surgery?," *Urol. Radiol.*, vol. 6, no. 1, pp. 80–87, 1984, doi: 10.1007/BF02923707.
- [26] M. Manzoor ul Haque *et al.*, "Safety and efficacy of extracorporeal shock wave lithotripsy for difficult-to-retrieve common bile duct stones: A ten-year experience," *J. Transl. Intern. Med.*, vol. 8, no. 3, pp. 159–164, 2020, doi: 10.2478/jtim-2020-0025.

VERIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS DE PROTONTERAPIA MEDIANTE PROTOACÚSTICA Y REDES NEURONALES

Joaquín Lopez Herraiz^{1*}
Clara Freijo Escudero¹
Javier García-Muñoz¹
Mailyn Perez-Liva¹
Daniel Sanchez Parcerisa¹
Jose Manuel Udias Moineiro¹

¹Grupo de Física Nuclear & IPARCOS. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

RESUMEN

La protonterapia es una técnica para tratar tumores con alta precisión que requiere la verificación de dosis para garantizar que ésta se administra en la zona planeada. Las ondas de presión termoacústica generadas por el haz de protones en los tratamientos de protonterapia pueden proporcionar información sobre la distribución de la dosis depositada en los tejidos. Este enfoque, llamado protoacústica, es un método prometedor para la verificación del rango de protones. En este trabajo, mostramos con simulaciones realistas y redes neuronales cómo es posible estimar la dosis depositada por un haz de protones pulsado a partir de las señales protoacústicas medidas con una precisión superior a 1 mm en menos de 100 ms. Esto puede usarse para generar una alerta en tiempo real si se encuentra una desviación significativa del plan de tratamiento. Los cálculos de dosis se realizaron con el sistema de planificación de tratamiento de código abierto matRad, mientras que k-Wave se utilizó para la propagación de ondas acústicas en 3D. Se está trabajando para verificar estos resultados con medidas experimentales, así como superar una serie de desafíos técnicos para su implementación práctica.

ABSTRACT

Proton therapy is a technique for treating tumors with high precision that requires dose verification to ensure that it is administered in the planned area. The thermoacoustic pressure waves generated by the proton beam in proton therapy treatments can provide information about the distribution of the dose deposited in the tissues. This approach, called protoacoustics, is a promising method for proton range verification. In this work, we show with realistic simulations and neural networks how it is possible to estimate

the dose deposited by a proton beam from the protoacoustic signals measured with a precision greater than 1 mm in less than 100 ms. This can be used to generate a real-time alert if

a significant deviation from the treatment plan is found. Dose calculations were performed with the open-source matRad treatment planning system, while k-Wave was used for 3D acoustic wave propagation. These results have to be verified with experimental measurements and some technical challenges have to be solved for its practical implementation.

Palabras Clave— Protoacústica, Protonterapia, Ultrasonidos, Verificación de Rango.

1. INTRODUCCIÓN

La protonterapia es un tipo de radioterapia que utiliza haces de protones para tratar el cáncer [1]. Ofrece ventajas en comparación con la radioterapia convencional con fotones debido a la forma en que esas partículas depositan su energía al interactuar con la materia. La pérdida de energía de los fotones disminuye exponencialmente con la profundidad, por lo que la dosis es máxima cerca de la entrada, no en el tumor. Además, los fotones no se detienen en un punto determinado, sino que atraviesan completamente el cuerpo dejando una cantidad significativa de dosis en regiones sanas. Por otro lado, la dosis de protones es menor en la entrada y máxima al final de su recorrido en la denominada región del pico de Bragg. Por lo tanto, los protones tienen un rango definido y limitado, y no se deposita ninguna dosis después, evitando daños secundarios a regiones sanas más allá de este rango (Figura 1). Debido a la fuerte caída de la dosis después del pico de Bragg, en la terapia de protones es crucial conocer con gran precisión la posición en la que se encuentra el pico de Bragg en el interior del paciente. Un error en la estimación del rango de los protones puede provocar que parte del volumen tumoral no se irradie, o que se entreguen cantidades elevadas de dosis a tejidos sanos, más allá del objetivo. Las estimaciones del alcance de los protones pueden verse afectadas por múltiples factores (mal posicionado del paciente, movimiento interno de órganos, posible aparición de gases o inflamación...). Por tanto, los planes clínicos amplían el volumen objetivo irradiado por un margen de

seguridad variable considerar las incertidumbres del rango, asegurando que el tumor esté completamente cubierto [2]. Esto limita los beneficios de la terapia de protones y aumenta la dosis recibida en tejidos sanos cercanos al tumor. Por tanto, la verificación del rango de los protones es uno de los principales desafíos de la física en la terapia con protones [3].

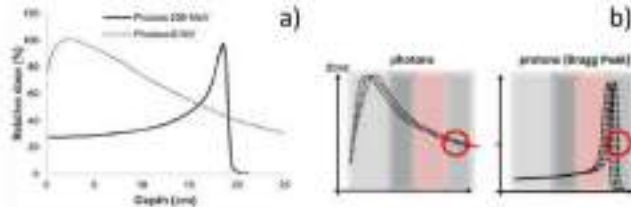


Figura 1. (a) Deposition de la dosis en función de la profundidad para fotones y protones [1] Incertidumbre en la dosis en función de la profundidad para fotones, protones [2].

La protoacústica es un método prometedor para la verificación del alcance de los protones en la protonterapia. Se basa en que las ondas de presión termoacústicas generadas proporcionan información sobre la distribución de la dosis depositada en los tejidos (Figura 2, parte superior). El reto de esta técnica es lograr a partir de las señales acústicas medidas obtener la distribución de la dosis depositada, o al menos, determinar si se diferencia significativamente de la dosis esperada (Figura 2, parte inferior).

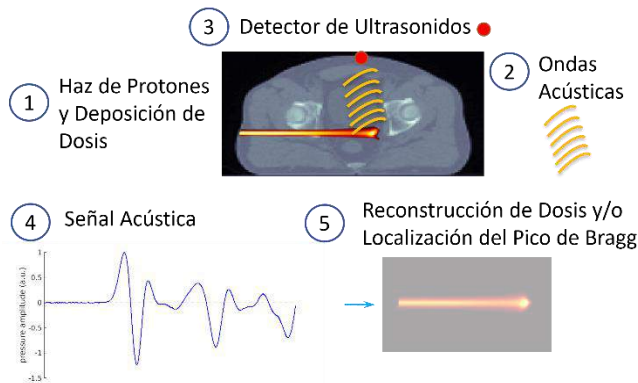


Figura 2. Esquema del proceso de generación y detección de señales protoacústicas y su posterior uso para determinar la distribución de dosis o localizar el pico de Bragg (parte inferior).

En trabajos previos hemos propuesto métodos (como algoritmos iterativos tipo MLEM o el uso de diccionarios) [4] para realizar esa determinación de la dosis a partir de señales protoacústicas. En este trabajo se ha desarrollado una red neuronal (ProtoNN) para estimar la ubicación del pico de Bragg (BP) a partir de las señales protoacústicas medidas, para cada punto de haz del plan de tratamiento.

2. MÉTODOS

El conjunto de datos de entrenamiento empleado para el entrenamiento de la red neuronal consistió en las señales acústicas simuladas a partir de cada uno de los haces de protones de una planificación de un tratamiento de protonterapia de campo único de un paciente de cáncer de próstata. El cálculo de la dosis se realizó con el sistema de planificación de código abierto matRad [5] (Figura 3). La deposición de dosis en un tratamiento de protonterapia se realiza mediante un largo conjunto de pequeños haces de protones, como se muestra por ejemplo en la Figura 4. Para cada uno de esos haces se simularon las señales protoacústicas recibidas por 4 detectores situados en la piel alrededor de la zona de tratamiento (Fig. 4) mediante k-Wave [6], que permite simular de manera realista la propagación en 3D de las ondas acústicas en el paciente (Fig. 5). La simulación del conjunto de casos usando una tarjeta gráfica GPU NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti tardó 90 minutos.



Figura 3. Interfaz gráfica del programa matRad usado para la estimación de la dosis aplicada en un tratamiento de protonterapia a partir de un CT de próstata.

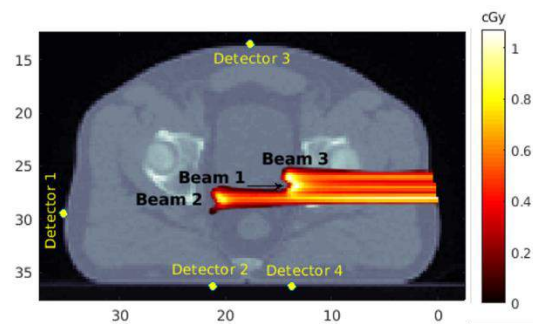


Figura 4. Ejemplo de haces de protones y dosis depositada de un tratamiento y situación de detectores de ultrasonidos.

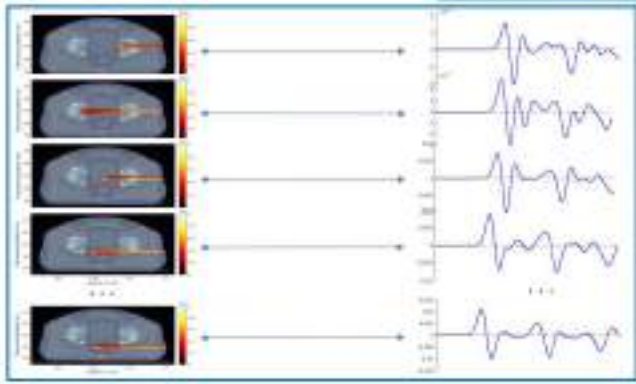


Figura 5. Ejemplo de señales de ultrasonidos obtenidas con el simulador con k-Wave para un sensor situado en la parte inferior del paciente para distintos haces de protones del tratamiento.

3. RED NEURONAL

La red neuronal propuesta, ProtoNN, se implementó en Google Colab [7] usando Tensorflow [8] y consta de tres capas completamente conectadas con un total de 1,5 millones de parámetros. La red fue entrenada utilizando 430 casos (290 casos de entrenamiento y 140 de validación).

La Figura 6 muestra cómo funciona la red neuronal empleada: los datos de entrada de ProtoNN corresponden a las señales protoacústicas detectadas por 4 detectores descriptas en la sección anterior y los datos de salida son las coordenadas (x,y,z) de la posición del pico de Bragg. La función de pérdida a minimizar en el entrenamiento de la red neuronal fue la distancia entre las coordenadas del punto de referencia y las coordenadas estimadas.

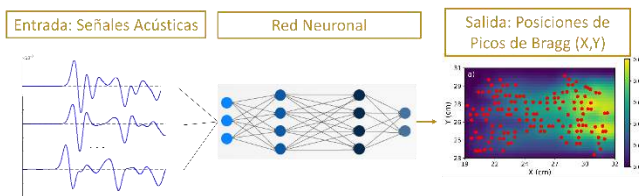


Figura 6. Esquema del uso de la red neuronal para lograr obtener las posiciones de los picos de Bragg de cada beaen la que a partir de un conjunto de señales protoacústica

4. RESULTADOS

La Figura 7 muestra a la izquierda la diferencia en el plano (x,y) de la posición de los puntos estimados y de referencia del pico de Bragg de un conjunto de casos seleccionados aleatoriamente del conjunto del tratamiento. El método propuesto alcanza una precisión promedio de 0,9 mm, requiriendo un tiempo de cálculo de 77 ms por cada haz. Asimismo, ProtoNN pudo detectar desviaciones en el paciente con respecto a la de planificación. En este ejemplo (Figura 7, derecha) la imagen de CT de referencia del

paciente se modificó insertando una región de aire (1,75x2,75x2,0 cm³) dentro del paciente en la dirección del haz, creando grandes desviaciones en la localización de los picos de Bragg estimados con respecto a la esperada por ProtoNN. Esto muestra cómo se podría usar como herramienta de verificación del rango de protones rápida, flexible y prometedora.

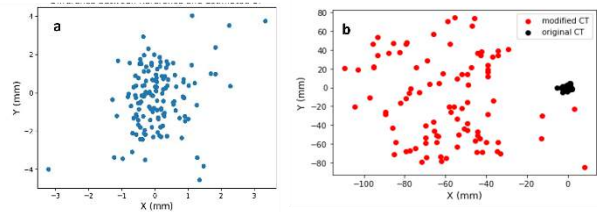


Figura 7. (a) Diferencias entre las posiciones del pico de Bragg estimadas respecto a las de referencia. (b) Posiciones estimadas para el caso en el que el CT del paciente es distinto del usado en la planificación (en rojo).

5. CONCLUSIONES

Las señales protoacústicas pueden permitir monitorizar la correcta realización de los tratamientos de protonterapia. Para obtener resultados en tiempo real, que permitan detectar cualquier posible desviación respecto a la planificación se puede emplear una red neuronal entrenada como la propuesta en este trabajo. Sin embargo, el uso de estos método en la práctica requerirá de un gran número de casos de entrenamiento y validación con señales reales.

6. REFERENCIAS

- [1] H. Paganetti, *Proton beam therapy*. IOP Publishing, 2017
- [2] Unkelbach, J. and Paganetti, H. Robust proton treatment planning: physical and biological optimization. In *Seminars in radiation oncology*, volume 28, pages 88–96. 2018.
- [3] A.-C. Knopf, and A. Lomax, “In vivo proton range verification: a review”. *Physics in Medicine and Biology*, 58 (15), R131-R160. 2013.
- [4] Clara Freijo et al., “Dictionary-based protoacoustic dose map imaging for proton range verification”. *Photoacoustics*, 21, 100240, 2021.
- [5] matRad: <https://github.com/e0404/matRad>
- [6] k-Wave: <http://www.k-wave.org/>
- [7] Google Colab: <https://colab.research.google.com/>
- [8] Tensorflow: <https://tensorflow.org/>

3D HYBRID METHOD FOR ASSESSING RE-RADIATED NOISE INDUCED BY RAILWAY TRAFFIC: NUMERICAL VALIDATION

Soares, Paulo J.^{1*}
Alves Costa, Pedro¹
Colaço, Aires¹
Arcos, Robert²
Godinho, Luís³

¹ Construct-FEUP, University of Porto, Porto, Portugal

² Acoustical and Mechanical Engineering Laboratory (LEAM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Terrassa (Barcelona), Spain

³ Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

ABSTRACT

In this study, a novel 3D hybrid methodology for assessing re-radiated noise induced by railway traffic is presented. This method combines numerical modelling techniques with experimental measurements to provide a comprehensive evaluation. Instead of fully modelling the train-track-ground system, the proposed methodology offers an innovative approach to accurately quantify, in a first step, the elastodynamic response of the building in the form of vibrations. Then, the structural velocities are used as input for a model based on the Method of Fundamental Solutions (MFS), enabling the assessment of the acoustic response inside the building's compartments. The ground-breaking aspect of the presented methodology lies in its ability to compute the dynamic response of the system without requiring any detailed information regarding the geometric or material properties of the track, rolling stock, and ground condition across the propagation path. The validation of this approach is achieved through a rigorous comparison between the results obtained using the hybrid method and those from a reference fully theoretical model of the system. The proposed hybrid methodology overcomes some of the limitations of traditional empirical models and offers a higher level of accuracy and flexibility in predicting railway-induced ground-borne noise.

Keywords: Building acoustics; Structure-borne noise and vibrations; building hybrid methodology

1. INTRODUCTION

One of the most common scenarios demanding a rigorous assessment of railway-induced noise and vibration occurs when planning the construction of new buildings near existing operational urban railway lines. In such instances, urban administrations typically require studies certifying that future buildings will comply with the noise and vibration regulations. Thus, predictive models for assessing railway-induced ground-borne noise and vibration levels within these buildings are imperative.

Over the past few decades, various theoretical models to assess railway-induced ground-borne noise and vibration in buildings have been developed to comprehensively address this issue, considering the entire system, including the railway infrastructure, the soil medium, and the target building. Early approaches, such as those by Balendra et al. [1,2] and Trochides [3], employed two-dimensional (2D) finite element method (FEM) modelling to assess train-induced vibrations. However, the transition to three-dimensional (3D) modelling approaches appearing in the literature has been motivated due to their enhanced accuracy in capturing complex wave propagation and precise representation of moving loads [4].

Empirical prediction models have also been widely used in engineering practice due to their simplicity and cost-effectiveness. The Federal Railroad Administration (FRA) and the Federal Transit Administration (FTA) introduced an empirical model for predicting vibration levels due to railway traffic [5], widely adopted for preliminary assessments. However, their limitations become evident when a detailed and highly accurate prognosis is required, as demonstrated by

* *Corresponding author:* up201305102@fe.up.pt

Copyright: ©2023 Soares, P. J. et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

recent studies [6]. Furthermore, uncertainty in predictions due to the varying local subsoil conditions has been highlighted in several studies, underlining the need for probabilistic models [7-12]. To address these challenges, hybrid modelling approaches combining experimental data and theoretical models have emerged as promising alternative [13-15].

Concerning the acoustic field, only a few works can be found concerning the prediction of re-radiated noise due to railway traffic through numerical approaches [16-22]. Given the potential negative effects induced by a continuous exposition to re-radiated noise, an increase in the interest of the scientific community in this field is expected in the near future.

In this study, a novel methodology for predicting ground-borne vibrations and re-radiated noise in new buildings induced by railway traffic is presented. It is worth emphasizing that this methodology exhibits remarkable versatility as it can be employed across a wide spectrum of vibration sources. The present approach utilizes railway-induced ground vibrations measured at the building's future location to compute virtual forces representing the incident wave field from the nearby railway line. These forces are then applied to a theoretical model of the building-soil system to predict vibration levels throughout the structure. Once the vibration velocities of the building elements are determined, it becomes possible to predict the re-radiated noise within each of its compartments. This methodology, characterized by a weak coupling between the railway infrastructure and building structure, simplifies the traditional numerical process since it reduces the domain of the model and the need for some data that is sometimes inexistent or confidential, such as soil condition from the source to the building, source characteristics, etc... Given that the measurements taken in the initial step enable to fully characterize the vibration source and a substantial portion of the propagation path, this approach will substantially diminish uncertainties of the prediction. This hybrid methodology has been previously examined through a parametric study and a rigorous verification [23] using synthetic vibration measurements from a 2D and 2.5D perspectives.

In this paper, a verification of this hybrid method for re-radiated noise predictions is conducted also employing synthetic ground measurements. This verification comprises different scenarios involving a two-story building with shallow foundations on homogeneous soil. The primary aim of this study is to assess the accuracy of vibration predictions obtained through the hybrid methodology, along with the re-radiated noise prediction within the building.

2. MODELLING APPROACH

2.1. General Description

The chosen modelling approach unfolds in two distinct phases: firstly, it involves calculating the induced vibration velocities of the building elements and, subsequently, it focuses on evaluating sound pressure levels inside the structure.

To validate the proposed methodology, sound pressure levels obtained through the hybrid model are compared with those derived from the reference model. Concerning vibrations, the reference model accounts for the entire system, taking into account the soil-structure interaction, directly computing the vibrations induced in the building due to the application of a point force on the ground surface. In the case of the hybrid approach, three essential models are employed: the soil model, which facilitates the acquisition of displacement fields at specified locations; the virtual force distribution as a model of the incident wave field; and the soil-building model, which enables the determination of the vibration transmitted to the building.

2.2. Vibration response

To compute the vibrations induced to the building, two modelling approaches have been employed: a hybrid methodology, and a Green-FEM 3D model, the latter representing the reference model.

The hybrid methodology for the assessment of the building response was firstly introduced by Arcos et al. [24], and its formulation is similar to the Method of Fundamental Solutions. This methodology is divided into three steps.

Step 1. To perform the experimental measurements of the vibration induced at the ground surface where the building structure will be constructed. In this work, synthetic responses will be used to verify the method and to study its accuracy. These artificial measurements have been obtained through a numerical model of the soil that includes the domain of collocation points, as shown in Figure 1 - Model 1.

Step 2. To determine the virtual forces, taking into account the “measured” response at the collocation points, transforming them from space-time domain into displacements in the frequency domain, collected in the vector \mathbf{U}_c . From those displacements, the virtual forces, \mathbf{F}_v , can be computed, according to Eq. (1).

$$\mathbf{F}_v = \mathbf{H}_{cf}^{-1} \mathbf{U}_c \quad (1)$$

The \mathbf{H}_{cf}^{-1} is a square receptance matrix that relates the virtual forces and the collocation points response obtained with a local subsoil model of the existing ground, as visually exemplified in Figure 1 – Model 2. Step 3:

Step 3. Computation of the building/soil system response according to Eq. (2).

$$\mathbf{U}_b = \mathbf{H}_{bf} \mathbf{F}_v \quad (2)$$

where \mathbf{U}_b represents the response of a set of evaluation points placed in the building/soil model and \mathbf{H}_{bf} is the receptance matrix that relates the virtual forces and the evaluation points

response. The H_{bf} matrix is obtained using the building-soil theoretical model specifically developed for the case study, as illustrated in Figure 1 - Model 3.

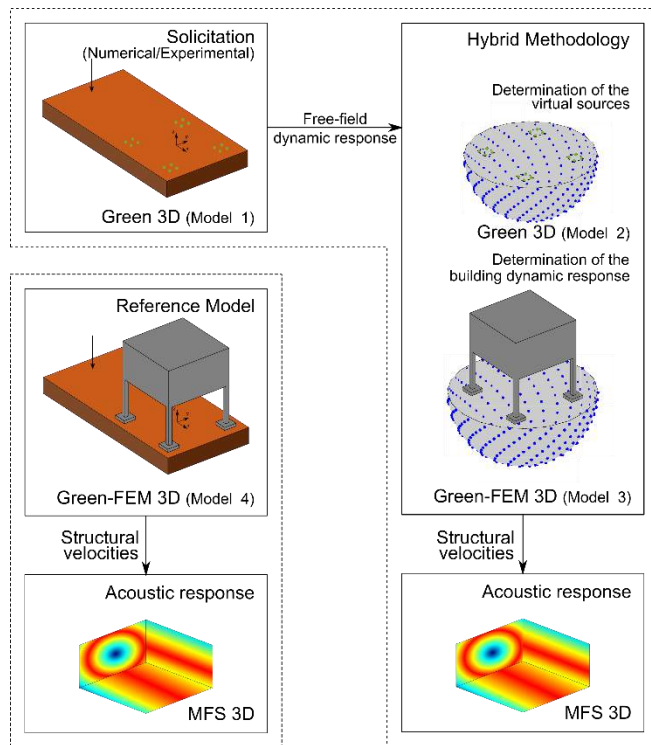


Figure 1. Representative scheme of the numerical modelling approach.

2.3. Acoustic response

For the determination of the acoustic response, an approach based on the method of fundamental solutions (MFS), previously validated by Colaço et al. [22] in an experimental context, is employed. The input parameters for the acoustic model are the vibration velocities of the structural elements of the building, obtained through the elastodynamic model of the building. Those vibration velocities are imposed as boundary conditions for the assessment of the sound pressure levels generated within the individual rooms of the building. This methodology corresponds to a collocation method that allows computing the response of the acoustic medium through a linear combination of the Green functions of the governing differential equation – the Helmholtz equation – considering a set of virtual sources positioned outside the propagating domain [25–28].

3. CASE STUDY

The primary objective of this case study is to compare the acoustic responses obtained inside a room of a building due to the application of a force on the ground surface, 7.5 meters

away from the geometrical centre of the building. This comparison will verify the correctness of the hybrid method and confirm its suitability for determining the vibration velocities of structural elements, which subsequently enable the prediction of re-radiated noise.

To streamline the parameter analysis, a homogeneous geotechnical scenario is considered, with properties listed in Table 1.

Table 1. Mechanical properties of the building-soil system, where E represents the Young’s modulus of the material, ρ its density, ν is Poisson’s ratio and η the material damping

Designation	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	η [-]
Soil	0.325	2000	0.3	0.03
Masonry walls	1.2	1200	0.2	0.03
Concrete	30	2500	0.2	0.02

The building structure was considered to be a reinforced concrete structure comprising two floors. To maintain simplicity, given the academic nature of this study, the building stands at a total height of 6 m with a footprint area of 5x5 m². Structural elements, including beams and columns, maintain regular dimensions of 0.2x0.4 square meters and 0.2x0.2 square meters, respectively, while the slab thickness measures 0.2 m. Masonry walls, of 0.15 meters thick, are integrated into the structure, and their mechanical properties are also detailed in Table 1. Four shallow foundations, each measuring 1x1 square meters with a thickness of 0.25 m, support the building. Additionally, Table 1 provides the mechanical properties of the concrete used in this structure.

Both the hybrid method and the acoustic model demand the definition of some deployment characteristics. In the case of the hybrid method, this entails defining the placement of the collocation points and virtual forces, while for the acoustic model, it involves choosing the virtual forces locations. In the context of the hybrid method, 100 virtual forces uniformly distributed within a semi-sphere with a radius of 4.5 meters are considered, surrounding the building foundations and centred at the building symmetry axis. This choice of virtual forces quantity adheres to the empirical guideline established, stating that the spacing between consecutive virtual forces should be smaller than the wavelength of S-waves in the medium for the frequency of interest, $d < \lambda_s$. In terms of the number of collocation points, an amount of four per foundation is adopted, totaling 16 collocation points. In Figure 2, it can be observed the position of the collocation points and virtual sources with respect to the location of the building foundations.

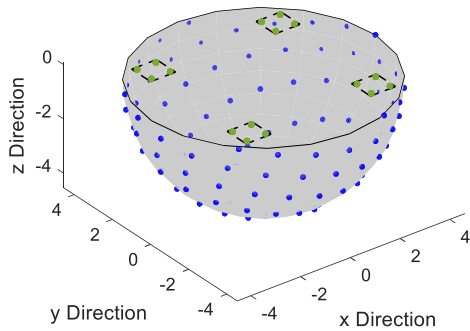


Figure 2. Representative scheme of the collocation points (green) and virtual forces (blue) with respect to the building foundations domains (dashed lines).

For the acoustic model, the collocation points were placed based on the locations of the building FEM model nodes, while the virtual forces were positioned with a one meter offset from the collocation points domain, as illustrated in Figure 3.

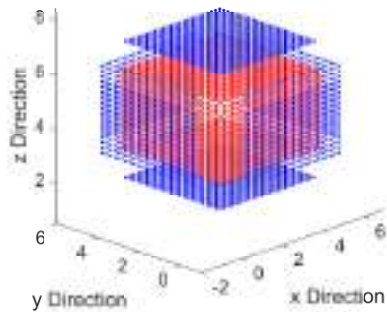


Figure 3. Representative scheme of the collocation points (red) and virtual forces (blue) of the re-radiated noise model.

4. RESULTS

In alignment with the initially defined primary objective of this study, the numeric computations were proceeded in two phases. First, the predicted displacements at each point within the domain were determined through the hybrid method and, simultaneously, through a direct approach, used as the reference model. Then, in the second part, the sound pressure levels within the building room under analysis were computed based on the vibration velocities of the building structural elements. Three evaluation points were chosen to compute and compare the response. The evaluation points were situated 0.5 meters away from the corners of the room, as illustrated in Figure 4.

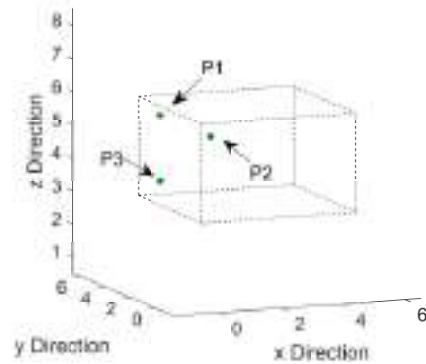


Figure 4. Location of the evaluation points.

Notably, the evaluation points P1 and P2 exhibit symmetry with respect to one of the problem symmetry axis, implying that their responses should be equivalent. Subsequently, the assessed sound pressure levels at each of these three evaluation points, are presented in Figures 5 to 7.

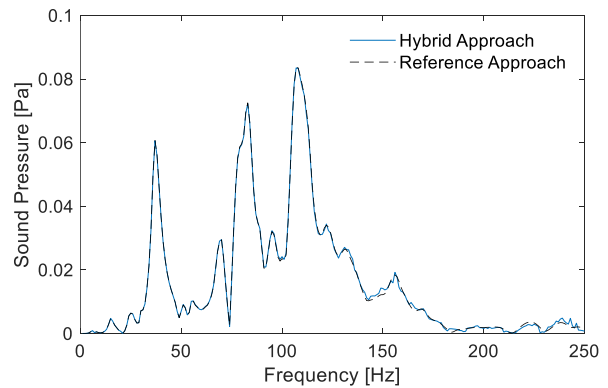


Figure 5. Acoustic pressure level calculated at Point P1, derived from vibrations obtained using the hybrid method (blue line), and through the reference model (black dashed line).

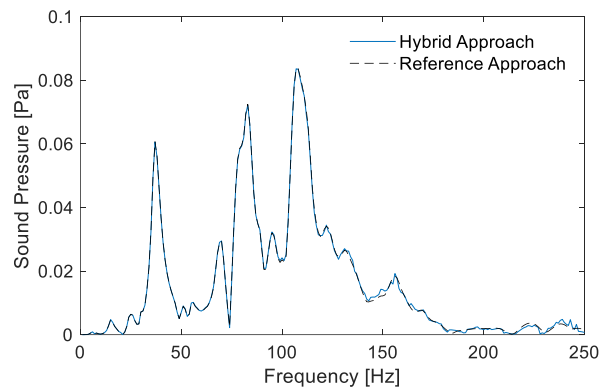


Figure 6. Acoustic pressure level calculated at Point P2, derived from vibrations obtained using the hybrid method (blue line), and through the reference model (black dashed line).

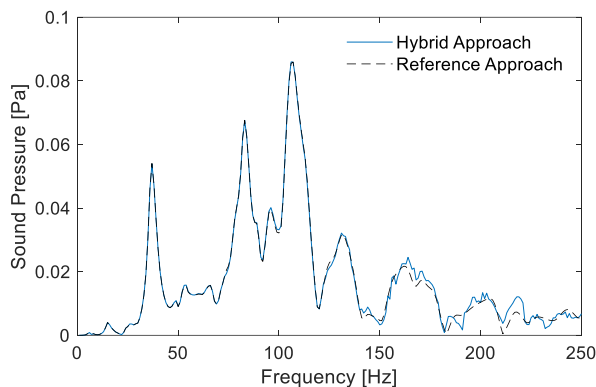


Figure 7. Acoustic pressure level calculated at Point P3, derived from vibrations obtained using the hybrid method (blue line), and through the reference model (black dashed line).

5. CONCLUSIONS

As observed in the obtained results, it should be highlighted the significant overall agreement between the sound pressure levels computed on each evaluating point through the two different approaches, for all the range of frequencies adopted in this study. The strong agreement observed emphasizes the capabilities of the hybrid methodology to accurately estimate the acoustic responses inside a room of a building. Notably, the differences between the responses become slightly higher at higher frequencies, which can be effectively mitigated by considering a larger number of collocation points on the ground surface. An increase in the amount of virtual forces can also produce slightly better results.

In conclusion, this hybrid methodology represents a substantial step forward to effectively deal with ground-borne vibrations and reradiated noise problems in buildings to be constructed near to vibration sources. The methodology can be used to develop accurate assessment studies that not only enhance living conditions but also play a pivotal role in ensuring regulatory compliance regarding exposure limits, thereby safeguarding the well-being of the occupants of the buildings affected by this issue.

By combining experimental measurements with numerical models, this approach offers a practical and reliable tool applicable to multiple scenarios. It not only provides precise predictions of vibration and noise levels but also reduces the levels of uncertainty in the final predictions, allowing for detailed studies of diverse types of mitigation measures. These studies empower stakeholders, especially infrastructure managers to choose the most effective mitigation measures for addressing the issue, allowing for the selection of solutions based on their cost-effectiveness.

6. ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by:

- Base Funding - UIDB/04708/2020 and Programmatic Funding - UIDP/04708/2020 of the CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções – funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC);
- Project PTDC/ECI-EGC/3352/2021, funded by national funds through FCT/ MCTES;
- European Union’s Horizon 2020 Programme Research and Innovation action under Grant Agreement No 101012456 – In2Track3;
- Individual Grant no. SFRH/BD/148276/2019, provided by FCT;
- Individual Grant no. 2022.00898. CEECIND (Scientific Employment Stimulus - 5th Edition) provided by FCT;
- Project WIBWAY: Web-based computational tool for the assessment of VIBrations induced by railWAY traffic, with grant reference PDC2022-133093-I00, funded by Agencia Estatal de Investigación (Spain) - Proyectos de Prueba de Concepto 2022.

7. REFERENCES

- [1] Balendra T, Chua KH, Lo KW, Lee SL. Steady-state vibration of subway-soilbuilding system. *J Eng Mech* 1989;115:145–62.
- [2] Balendra T, Koh CG, Ho YC. Dynamic response of buildings due to trains in underground tunnels. *Earthq Eng Struct Dynam* 1991;20:275–91.
- [3] Trochides A. Ground-borne vibrations in buildings near subways. *Appl Acoust* 1991;32:289–96.
- [4] Sheng X, Jones CJC, Thompson DJ. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *J Sound Vib* 2006; 293:575–86.
- [5] Quagliata A, Ahearn M, Boeker E, Roof C, Volpe JA. Transit noise and vibration impact assessment manual, technical report 0123. Federal Transit Administration;
- [6] Sadeghi J, Esmaili MH, Akbari M. Reliability of FTA general vibration assessment model in prediction of subway induced ground borne vibrations. *Soil Dynam Earthq Eng* 2019;117:300–11. 2018.
- [7] Lombaert G, Degrande G, Clouteau D. The influence of the soil stratification on free field traffic-induced vibrations. *Arch Appl Mech* 2001;71:661–78.
- [8] Jones S, Kuo K, Hussein M, Hunt H. Prediction uncertainties and inaccuracies resulting from common assumptions in modelling vibration from underground railways. *Proc Inst Mech Eng - Part F J Rail Rapid Transit* 2012;226:501–12.
- [9] Lopes P, Alves Costa P, Calçada R, Silva Cardoso A. Influence of soil stiffness on building vibrations due to railway traffic in tunnels: numerical study. *Comput Geotech* 2014;61:277–91.

- [10] Schevenels M, Lombaert G, Degrande G, François S. A probabilistic assessment of resolution in the SASW test and its impact on the prediction of ground vibrations. *Geophys J Int* 2008;172:262–75.
- [11] Schevenels M. The impact of uncertain dynamic soil characteristics on the prediction of ground vibration. Ph.D. thesis. Katholieke Universiteit Leuven; 2007.
- [12] Papadopoulos M, François S, Degrande G, Lombaert G. The influence of uncertain local subsoil conditions on the response of buildings to ground vibration. *J Sound Vib* 2018;418:200–20.
- [13] Kuo KA, Verbraken H, Degrande G, Lombaert G. Hybrid predictions of railway induced ground vibration using a combination of experimental measurements and numerical modelling. *J Sound Vib* 2016;373:263–84.
- [14] López-Mendoza D, Romero A, Connolly DP, Galvín P. Scoping assessment of building vibration induced by railway traffic. *Soil Dynam Earthq Eng* 2017;93:147–61.
- [15] López-Mendoza D, Connolly DP, Romero A, Kouroussis G, Galvín P. A transfer function method to predict building vibration and its application to railway defects. *Construct Build Mater* 2020;232.
- [16] Nagy AB, Fiala P, Márki F, Augusztinovicz F, Degrande G, Jacobs S, et al. Prediction of interior noise in buildings generated by underground rail traffic. *J Sound Vib* 2006;293(3–5):680–90.
- [17] Fiala P, Degrande G, Augusztinovicz F. Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic. *J Sound Vib* 2007;301(3–5):718–38.
- [18] Romero A, Galvín P, António J, Domínguez J, Tadeu A. Modelling of acoustic and elastic wave propagation from underground structures using a 2.5D BEM-FEM approach. *Eng Anal Boundary Elem* 2017;76:26–39.
- [19] Colaço A, Alves Costa P, Amado-Mendes P, Godinho L. Prediction of vibrations and reradiated noise due to railway traffic: a comprehensive hybrid model based on a finite element method and method of fundamental solutions approach. *J Vib Acoust* 2017;139(6). 061009-061009-10.
- [20] António J, Tadeu A, Godinho L. A three-dimensional acoustics model using the method of fundamental solutions. *Eng Anal Boundary Elem* 2008;32(6):525–31.
- [21] Nennig B, Perrey-Debain E, Chazot JD. The method of fundamental solutions for acoustic wave scattering by a single and a periodic array of poroelastic scatterers. *Eng Anal Boundary Elem* 2011;35(8):1019–28.
- [22] Colaço, A., Costa, P. A., Amado-Mendes, P., Magalhaes, F., & Godinho, L. (2018). Experimental validation of a FEM-MFS hybrid numerical approach for vibro-acoustic prediction. *Applied Acoustics*, 141, 79-92.
- [23] Arcos, R., Soares, P. J., Costa, P. A., & Godinho, L. (2021). An experimental/numerical hybrid methodology for the prediction of railway-induced ground-borne vibration on buildings to be constructed close to existing railway infrastructures: Numerical validation and parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150, 106888.
- [24] R. Arcos, A. Clot, J. Romeu, Dynamic representation of excitation sources on construction- induced vibration problems based on multiple harmonic loads applied on the ground, in: *Proceedings of 46th international congress and exposition on noise control engineering, Internoise 2017, Hong-Kong.*
- [25] António J, Tadeu A, Godinho L. A three-dimensional acoustics model using the method of fundamental solutions. *Eng Anal Boundary Elem* 2008;32(6):525–31.
- [26] Godinho L, Branco FG, Amado Mendes P. 3D multi-domain MFS analysis of sound pressure level reduction between connected enclosures. *Arch Acoust* 2011;36(3):575–601.
- [27] Godinho LMC, Costa EGA, Pereira ASC, Santiago JAF. Some observations on the behavior of the method of fundamental solutions in 3D acoustic problems. *Int J Comput Methods* 2012;9(4).
- [28] Godinho L, Amado Mendes P, Ramis J, Cardenas W, Carbajo J. A numerical MFS model for computational analysis of acoustic horns. *Acta Acustica United Acustica* 2012;98(6):916–27.

PREDICTION OF GROUND-BORNE VIBRATIONS INDUCED BY RAILWAY TRAFFIC BASED ON MACHINE LEARNING TECHNIQUES

Aires Colaço^{1}*
Ana Ramos¹
Pedro Alves Costa¹
Mohammed Hussein²

¹CONSTRUCT – FEUP, University of Porto

²Department of Civil and Environmental Engineering, Qatar University

ABSTRACT

Over the latter years, there was a demand for the development of advanced numerical techniques for the prediction of ground-borne vibrations induced by railway traffic which can provide the desired level of accuracy, despite of structural complexity of the entire system. Despite the suitability of these models in dealing with such phenomena, their applicability to cases where it is intended to have a general assessment of the potential impacts of a new/updated railway project is difficult to achieve. In such cases, the development of expedited prediction methods is desired, allowing the delimitation of cases that require a deeper analysis, using advanced numerical models, and of those that can be immediately discarded, with all the benefits of cost and time associated. Thus, it is the intention to develop an innovative prediction tool, powered by an efficient and intelligent calculation engine based on surrogate modelling, that allows an efficient assessment of ground-borne vibrations at the free-field surface due to railway operation.

Keywords — railway traffic; ground-borne vibrations; numerical modeling; surrogate model.

1. INTRODUCCIÓN

The management of densely populated urban areas, their mobility and the need to combat climate change are major challenges for the society, which justify the wide expansion of railway projects in modern cities. Although the benefits (economic, social and environmental) inherent to rail transport are evident, their exploration leads to environmental concerns, motivated by the generation and propagation of vibrations and noise that affect the comfort and life quality of the inhabitants in railway surroundings. Over latter years

there was a demand for the developing of advanced numerical techniques from the vibration source (vehicle-track interaction) up to the receiver (building). Generically, these models take into account the following patterns associated with the physical problem: i) the movement of the train on the track constitutes the source of vibrations; ii) the energy is spread in the ground; iii) the vibration field reaches nearby buildings giving rise to vibrations and noise [1-8].

Despite the suitability of these models in dealing with such phenomena, predicting vibration levels demands high-standard numerical models, which require huge computational cost. This condition is enhanced when it is intended to have a general assessment of the potential impacts of new/updated railway projects. In such cases, the development of expedited prediction methods is desired, allowing the delimitation of cases that require a deeper analysis, using advanced numerical models, and of those that can be immediately discarded, with all the benefits of cost and time associated.

Thus, it is the intention to develop a prediction tool, powered by an efficient and intelligent calculation engine based on surrogate modelling, that allows an efficient assessment of ground-borne vibrations at the free-field surface due to railway operation.

2. NUMERICAL APPROACH

The prediction tool of the track-(tunnel)-ground system response is designed in two layers: i) semi-analytical/numerical modelling the subsystems of the railway infrastructure; and ii) development of a surrogate model to have a ‘quick-to-compute’ engine.

In what concerns to the first layer, a large database will be created based on massive simulations that aim to represent the most typical situations that can be faced in railway

* **Autor de contacto:** aires@fe.up.pt

Copyright: ©2023 Colaço et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

infrastructure projects. In this perspective, advanced numerical models already developed by the authors will be employed [9-11].

For the second layer, and instead of performing the physical modelling of the system (which requires a huge computational effort), the so-called surrogate models will be created to easily obtain results through a relatively simple and ‘quick to-compute’ emulator of results. Figure 1 presents a general overview of the prediction tool.

3. PRELIMINARY RESULTS

Advanced numerical models previously developed by the research group and experimentally validated are used in this task for the simulation of the track-ground system. Based on that, it was possible to compute the free-field response for different scenarios. The parametric studies performed attend to different characteristics of rolling stock, railway infrastructure, and geotechnical conditions. A total of 648 parametric studies were considered for the generation of the

database. The modelling parameters considered for each case are presented in Figure 2.

From the advanced numerical method used, it was possible to compute the free-field response. Figure 2a and b) presents, as an example, the vertical vibration velocity for a point above the tunnel and at the surface (time domain and frequency content) for Profile 1 defined in Figure 2. Figure 3c presents the maximum value of the Running RMS (in dB) for different distances to the centre of the tunnel.

To fulfill the objectives initially stated, machine learning algorithms, namely Artificial Neural Networks (ANN) and Support Vector Machine (SVM) techniques, are applied to this type of problem. The expected outputs correspond to the evaluation of the maximum vibrations levels expected at the ground surface and the frequency content. Considering the validation scenario defined in Figure 4a, the results obtained by the different techniques are compared with numerical results (observed). It is possible to observe a positive correlation in the results, either in the time and frequency domain.

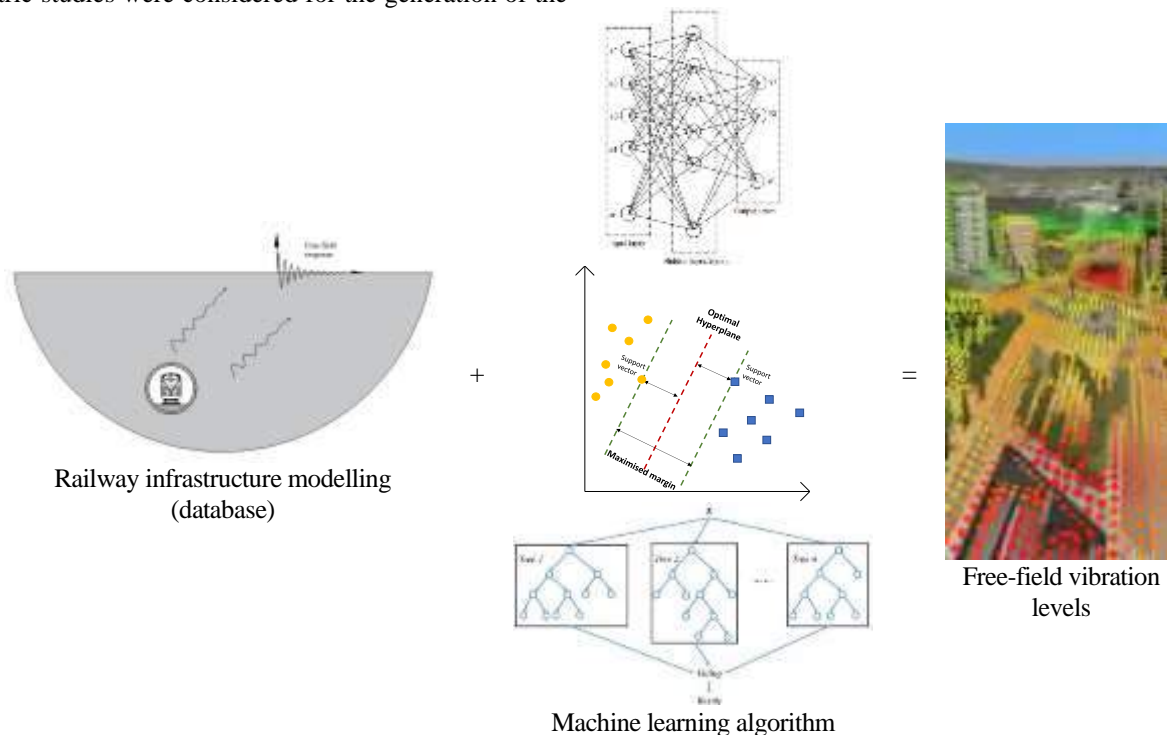


Figure 1. General overview of the surrogate model.

Profile ID	Train		Track										
	Type	Speed [km/h]	Unevenness class (FRA)	Rail		Railpad		Slab				Mat	
				EI [N.m ²]	Mass [kg/m]	K [kN/mm]	C [kNs/mm]	Thickness [m]	b [m]	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	K [N/m ²]	C [Ns/m ²]
1	EuroTrain	100	6	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	1,00E+20	5,50E+04
2	EuroTrain	100	6	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	1,00E+20	5,50E+04
3	EuroTrain	100	6	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	1,00E+20	5,50E+04
...
645	TramTrain	60	4	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	4,00E+07	5,50E+04
646	TramTrain	60	4	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	4,00E+07	5,50E+04
647	TramTrain	60	4	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	4,00E+07	5,50E+04
648	TramTrain	60	4	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	4,00E+07	5,50E+04

Profile ID	Tunnel							Ground			
	Tunnel depth [m]	Tunnel radius [m]	Tunnel wall					Properties			
			Thickness [m]	E [Mpa]	ν [-]	ξ [-]	ρ [kg/m ³]	Cs [m/s]	ν [-]	ξ [-]	ρ [kg/m ³]
1	9	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	150	0,35	0,05	1900
2	9	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	150	0,35	0,03	1900
3	9	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	300	0,35	0,04	1900
...
645	21	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	300	0,35	0,04	1900
646	21	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	300	0,35	0,02	1900
647	21	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	800	0,35	0,03	1900
648	21	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	800	0,35	0,02	1900

Figure 2. Defined mechanical and geometrical properties of the train-track-tunnel-ground system.

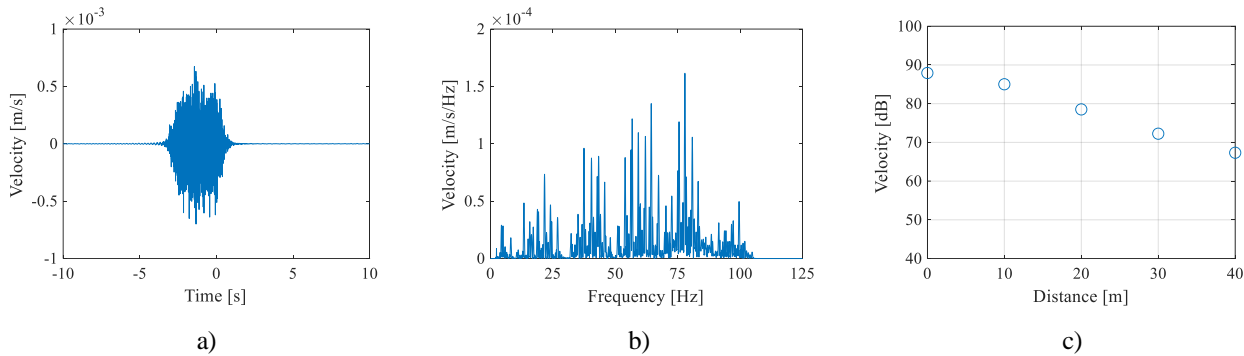


Figure 3. Defined mechanical and geometrical properties of the train-track-tunnel-ground system.

Profile ID	Train		Track										
	Type	Speed [km/h]	Unevenness class (FRA)	Rail		Railpad		Slab				Mat	
				EI [N.m ²]	Mass [kg/m]	K [kN/mm]	C [kNs/mm]	Thickness [m]	b [m]	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	K [N/m ²]	C [Ns/m ²]
1	EuroTrain	100	6	6,14E+06	60,34	1,01E+09	2,25E+04	0,3	2,75	30,00	2500	1,00E+20	5,50E+04

Profile ID	Tunnel							Ground			
	Tunnel depth [m]	Tunnel radius [m]	Tunnel wall					Properties			
			Thickness [m]	E [Mpa]	ν [-]	ξ [-]	ρ [kg/m ³]	Cs [m/s]	ν [-]	ξ [-]	ρ [kg/m ³]
1	9	3	0,3	3,00E+04	0,2	0,01	2500	200	0,35	0,04	1900

a)

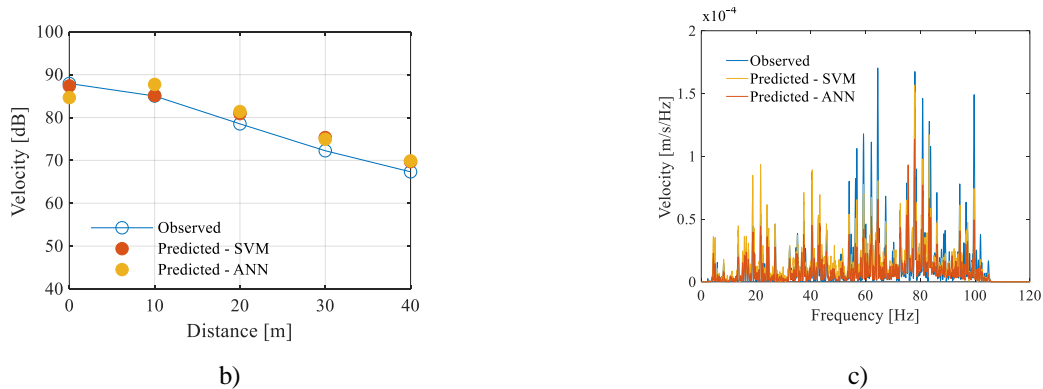


Figure 4. Surrogate model results: a) validation example properties; b) Maximum running RMS versus distance to tunnel axis; c) frequency content of a point above the tunnel and at the surface.

4. CONCLUSIONS

From the results achieved, it is possible to conclude that the presented methodology is able to be used in the prediction of the dynamic response of the track-ground-building system, allowing a computationally efficient assessment of free-field vibrations due to railway operation. In order to make the prediction tool able to be used by technicians that, although have basic knowledge about the topic, are not experts on railway noise and vibrations, it is intended the development of a user-friendly framework of wider practical application. The integration of the prediction tool with GIS (Geographical Information Systems) can also be useful for the visualization of problematic regions, allowing focus on those problematic areas, either through additional and more complex numerical studies or the design of mitigation measures.

Acknowledgements. This work was financially supported by: Base Funding - UIDB/04708/2020 and Programmatic Funding - UIDP/04708/2020 of the CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções – funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC); Project PTDC/ECI-EGC/3352/2021, funded by national funds through FCT/ MCTES; European Union’s Horizon 2020 Programme Research and Innovation action under Grant Agreement No 101012456 – In2Track3; Grant no. 2022.00898.CEECIND (Scientific Employment Stimulus - 5th Edition) provided by “FCT– Fundação para a Ciência e Tecnologia”.

5. REFERENCIAS

[1] Lombaert, G., G. Degrande, and D. Clouteau, Numerical modelling of free field traffic-induced vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000. 19(7): p. 473-488.
 [2] Sheng, X., C.J.C. Jones, and D.J. Thompson, A comparison of a theoretical model for quasi-statically and

dynamically induced environmental vibration from trains with measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 2003. 267(3): p. 621-635.
 [3] Colaço, A., P.A. Costa, and D.P. Connolly, The influence of train properties on railway ground vibrations. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016. 12(5): p. 517-534.
 [4] Galvín, P., et al., A 2.5D coupled FE-BE model for the prediction of railway induced vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010. 30(12): p. 1500-1512.
 [5] François, S., et al., The influence of dynamic soil-structure interaction on traffic induced vibrations in buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007. 27(7): p. 655-674.
 [6] Lopes, P., et al., Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model. *Science of The Total Environment*, 2016. 568: p. 1333-1343.
 [7] Colaço, A., et al., Prediction of Vibrations and Radiated Noise Due to Railway Traffic: A Comprehensive Hybrid Model Based on a Finite Element Method and Method of Fundamental Solutions Approach. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2017. 139(6).
 [8] Nagy, A.B., et al., Prediction of interior noise in buildings generated by underground rail traffic. *Journal of Sound and Vibration*, 2006. 293(3-5): p. 680-690.
 [9] Alves Costa, P., R. Calçada, and A. Silva Cardoso, Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012. 32(1): p. 111-128.
 [10] Lopes, P., et al., Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014. 61-62: p. 269-285.
 [11] Colaço, A., et al., Vibrations induced by railway traffic in buildings: Experimental validation of a sub-structuring methodology based on 2.5D FEM-MFS and 3D FEM. *Engineering Structures*, 2021. 240.



AValiação da Componente Vibração em Estudos de Impacte Ambiental para Projetos de Vias-Ferreas em Zonas Urbanas: Atualização de Aspectos Metodológicos e Práticas Correntes em Portugal

Sónia Monteiro Antunes^{1*}
Jorge Viçoso Patrício²

^{1,2}Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

RESUMEN

A presente comunicação apresenta uma atualização do guia de atuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade à vibração e ao uído estrutural no interior de residências, proposto pelos autores, em 2019. Esta atualização, decorrente da experiência no acompanhamento dos diversos estudos de impacte ambiental realizados desde 2019, especialmente em zonas densamente urbanizadas, preconiza a utilização de indicadores adicionais, especialmente durante a fase de construção. Foram realizados pequenos ajustes aos indicadores já utilizados, assim como a atualização de procedimentos, decorrentes da publicação de novos documentos normativos. Neste contexto, é apresentado um resumo do referido guia, enfatizando-se os seguintes aspetos: Metodologia de caracterização para estudos de vibrações; Caraterização da vibração e do ruído estrutural durante as fases de construção e exploração; Critérios de admissibilidade, e Monitorização de vibrações.

ABSTRACT

This communication presents an update to the methodological guide for reducing the occurrence of potential nuisance situations due to vibration and ground-borne noise inside homes, proposed by the authors in 2019. This update, results from experience in following various environmental impact studies carried out since 2019, especially in densely urbanized areas. Additional indicators were introduced, especially during the construction phase. As a result of the publication of new normative documents, small adjustments were made to the indicators already used, and updated procedures were introduced. In this context, a summary of the updated guide is presented, emphasizing the following aspects: Characterization methodology for vibration studies; Characterization of vibration during the

construction phase and vibration and ground borne noise structural during the project exploration phase; Admissibility criteria, and Vibration monitoring.

Palabras Clave— *Acustica, Vibracoes, Incomodidade*

1. INTRODUÇÃO

Com a melhoria da qualidade da edificação, mais especificamente do respetivo isolamento sonoro, outros aspetos começaram a ter uma maior importância na definição do conforto dentro das habitações. Em zonas urbanas, os efeitos das vibrações devido à circulação de tráfego ferroviário, desde alguns anos começaram a ter especial relevância. Efetivamente os ocupantes dos edificios podem percecionar diretamente as vibrações, entendidas como vibrações mecânicas (para frequências entre 1-80 Hz), ou indiretamente, como ruído estrutural na gama de frequências 16-250 Hz). Este último efeito pode ser particularmente sensível em residências com um bom isolamento sonoro, nomeadamente em relação ao exterior, e quando a via-férrea se localiza em túnel, como é o caso das linhas de Metro.

Em projetos ferroviários, as previsões detalhadas de vibração (discriminação dos valores de velocidade de vibração no interior dos edificios, em bandas de terço de oitava) são geralmente realizadas durante a fase de projeto final de um empreendimento, e em situações particulares, quando há motivos suficientes para suspeitar de impacto adverso relativo ao descritor vibração. Por exemplo, no caso de edificios sobrejacentes ao traçado da via, ou na envolvente próxima. É consideravelmente complexo desenvolver previsões detalhadas de propagação de vibrações, com recurso a métodos numéricos, constituindo-se atualmente como um campo de investigação em desenvolvimento. Neste contexto, a Organização Internacional de Normalização publicou a norma ISO 14837-1: 2015 [1], onde foi estabelecido um guião geral para o desenvolvimento de

* **Autor de contacto:** santunes@miemail.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

modelos de previsão para as vibrações e ruído estrutural induzido pelo tráfego ferroviário, designadamente nas etapas de calibração, validação e verificação da sua implementação. Este documento prevê a possibilidade de utilização de modelos paramétricos assentes em métodos de análise numérica (FEM, FDM, BEM ou híbridos), de métodos empíricos, com recurso a extrapolação de dados de medição, ou então a utilização de métodos semiempíricos, que constituem uma combinação dos modelos anteriormente referenciados. Um exemplo desta atuação seria, por exemplo, a utilização de um modelo numérico para a caracterização da fonte de emissão e correspondente solicitação na parede do túnel do metro, e o recurso a métodos empíricos para a caracterização da propagação das vibrações do túnel até aos edifícios mais próximos, a partir da obtenção das funções de transferência. Para situações menos complexas (por exemplo, uma via a superfície), ou então na fase de estudo prévio, para a avaliação das diferentes opções, usualmente considera-se adequada a previsão dos valores de velocidade de vibração resultantes da exploração do empreendimento, com recurso a modelações mais simplificadas, como por exemplo, o método geral descrito no documento da Administração Federal de Transito dos EUA [2] (FTA, 2018). Este documento utiliza dados tabelados para 3 tipos de composição ferroviária, para o desenvolvimento de uma curva da variação do nível de vibração (resultantes de um número alargado de medições efetuadas nos EUA), em função da distância à via. Refira-se, contudo, a necessidade de conversão das unidades referenciadas neste guia (designadamente a utilização de metro em vez de polegada, devendo-se utilizar níveis de referência para a velocidade de vibração distintos: $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, em vez 10^{-6} in/s). Os níveis de vibração no interior do edifício são estimados pela leitura dos valores da curva e da aplicação de correções, de modo a contabilizarem-se diferentes fatores, como por exemplo: o tipo de sistema de suporte de via, o tipo de composições ferroviárias e correspondente velocidade de circulação, o tipo de condições geológicas dos solos, o tipo de fundações e o número de pisos dos edifícios. Este método geral, não considera o espectro de vibração, tendo somente em conta o nível de vibração global. Saliente-se a importância de validação das previsões realizadas, por meio de medições experimentais, a partir da determinação de funções de transferência, quer fazendo uso de modelos numéricos avançados, como utilizando-se métodos de previsão da velocidade de vibração mais simplificadas. Esta validação deverá ocorrer, e numa fase anterior à execução da solução de via-férrea selecionada.

Os níveis sonoros no interior dos edifícios próximos de vias-férreas são muitas vezes uma combinação de ruído aéreo e ruído induzido pela vibração transmitida pelas fundações do edifício (ruído estrutural), e muitas vezes proveniente da mesma fonte (principalmente nas vias à superfície). Usualmente a previsão do ruído estrutural é realizada a partir das previsões da velocidade de vibração, nos pisos dos

edifícios. Para a sua determinação, são usualmente utilizados métodos simplificados, com recurso a fatores de conversão entre a velocidade de vibração e os níveis sonoros, em função da frequência, como indicado no documento da FTA (FTA, 2018). Também na norma ISO/TS 14837-31 [3] são apresentadas expressões simplificadas derivadas da aplicação do método de análise estatística de energia para a estimativa da previsão do nível de ruído estrutural (no centro do compartimento), a partir da previsão dos valores de velocidade de vibração no centro dos pisos dos edifícios. Neste caso, as simplificações utilizadas são válidas para compartimentos com pisos e tetos de maior massa (betão), admitindo-se estas duas superfícies como superfícies radiantes, e considerando que as paredes laterais são constituídas por materiais mais leves (e consequentemente radiam menos nas baixas frequências, desprezando-se o seu contributo). Admite-se também que os pisos têm uma dimensão corrente (área igual 10m^2), e que os revestimentos das superfícies interiores confere um tempo de reverberação igual a 0,5 s. Com a finalidade de ultrapassar as limitações relativas à validade das previsões apresentadas na norma anterior, refira-se o trabalho que está a ser realizado pela Comissão de Normalização Europeia, designadamente pelo comité técnico 126, que pretende desenvolver um método para a modelação dos níveis sonoros no interior de compartimentos dos edifícios, provenientes de fontes de vibração externas, e no qual o ruído estrutural no interior de edifícios derivado do funcionamento do tráfego ferroviário se inclui.

No que respeita a aspetos de incomodidade à vibrações e ruído estrutural devido ao tráfego ferroviário, embora não exista legislação portuguesa específica para o efeito, refere-se que Diretiva EU 2016/797, de 11 de maio de 2016, relativa à interoperabilidade do sistema ferroviário na União Europeia, indica no Anexo III, que nas zonas próximas de infraestruturas ferroviárias, a exploração do sistema ferroviário não deve provocar, no solo, um nível de vibrações inadmissível para as atividades que se desenrolem nas áreas próximas da infraestrutura, quando em condições normais de operação. Neste contexto, foi publicado pelos autores em 2019, um guia de atuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências, derivado do funcionamento do metropolitano de Lisboa. Tendo em conta a evolução natural dos estudos técnicos, atualizações normativas, e a própria experiência dos autores no acompanhamento dos diversos estudos de impacte ambiental realizados desde 2019, apresenta-se nesta comunicação uma atualização desse guia de 2019.

2. ESTUDOS DE IMPACTE AMBIENTAL

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 152-B/2017, de 11 de dezembro, que se encontra em vigor desde o início de 2018,

estabelece o regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental (RJAA) dos projetos públicos e privados suscetíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente. Esta lei transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2014/52/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de abril de 2014, que altera a Diretiva n.º 2011/92/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de dezembro de 2011, relativa à avaliação dos efeitos de determinados projetos públicos e privados no ambiente. Nos descritores vibração e ruído, a metodologia geral num processo de avaliação de impacte ambiental para uma infraestrutura ferroviária, inicia-se com a identificação das ações geradoras de impacte, análise das consequências decorrentes das referidas ações e previsão dos impactes associados nos recetores potencialmente expostos. A avaliação dos impactes associados deve ser realizada para as fases de construção, exploração e (eventualmente) desativação, com indicação da sua natureza (positivo, negativo ou nulo), ordem (direto ou indireto), duração (temporário e permanente), magnitude (pouco significativo, significativo, muito significativo) extensão (geográfica e população afetada). Caso haja recetores sensíveis dentro da área de influência do projeto, e a ultrapassagem das disposições legais ou normativas, deverão ser adotadas medidas de minimização, privilegiando-se soluções de correção na fonte ou no meio de transmissão. Posteriormente à estimação do impacte ambiental e à definição de eventuais medidas de minimização, devem ser estabelecidos programas de monitorização, nos pontos recetores selecionados. Estes programas assentam em campanhas de observação e de recolha sistemática de dados sobre o estado do ambiente ou sobre os efeitos ambientais de determinado projeto. O referido programa, também deve contemplar procedimentos a seguir caso existam reclamações. Resumidamente, pode-se dizer que um estudo de impacte ambiental para o descritor vibração (e no qual se inclui o ruído estrutural) é constituído pelas seguintes etapas:

Em fase de estudo prévio:

- Caraterização da situação de referência e prospetiva para o ano inicial do projeto;
- Pospetiva dos níveis de vibração e ruído estrutural resultantes das diferentes alternativas para o empreendimento, para as fases de construção, exploração e desativação, e levantamento de todos os recetores potencialmente expostos;
- Avaliação dos impactes para todas as fases do projeto;
- Definição genérica das medidas de minimização, para as diferentes alternativas;
- Análise comparativa das diferentes alternativas, em termos da exposição às vibrações e medidas de minimização possíveis;

Em fase de projeto de execução:

- Pospetiva dos níveis de vibração associados ao projeto, para as fases de construção, exploração e desativação para os recetores anteriormente identificados;
- Avaliação dos impactes para todas as fases do projeto (construção, exploração e desativação);
- Definição das medidas de minimização, com indicação da respetiva eficácia, em função da frequência (no mínimo em bandas de oitava), características técnicas dos materiais utilizados e indicação das estimativas do nível de vibração e ruído estrutural, com e sem adoção dessas medidas
- Definição de um programa de monitorização.

Apresentam-se de seguida as principais revisões (e ou atualizações) do guia de 2019 [3], associados às diferentes etapas do projeto.

2.1. Caraterização da situação de referência

Nesta etapa do projeto é necessário caracterizar a situação de referência a partir de um levantamento do local que englobe a identificação dos principais recetores sensíveis (habitações, escolas, hospitais, espaços de recreio e lazer utilizados pelas populações como locais de recolhimento, assim como edifícios com requisitos específicos relativamente à vibração) e a identificação de fontes de vibração relevantes. Para o efeito, deve ser apresentado um relatório de medições que inclua toda a informação solicitada, e eventual replicação da mesma.

Adicionalmente, também deverá ser realizado um levantamento detalhado do edificado sobrejacente na envolvente do traçado, no que respeita ao comportamento às vibrações atendendo ao tipo de ocupação e utilização, e ao tipo de estrutura.

2.2. Fase de construção

2.2.1. Identificação de impactes

A identificação dos impactes esperados durante a fase de construção em termos de dano, deve assentar numa avaliação quantitativa dos valores de pico da velocidade de vibração induzidos nos edifícios mais próximos (residenciais, históricos, igrejas, instalações laboratoriais, e edifícios que demonstrem um maior potencial de dano), devido ao funcionamento da obra. Tipicamente são utilizados valores tabelados de velocidade de vibração das ações características das obras, em função da distância, publicados na norma inglesa BS 5528-2 [5], que, em alguns casos, podem ser complementados com valores resultantes de medições efetuadas em obras similares anteriores. Para esta previsão também poderão ser utilizados outros documentos, como por exemplo o documento orientativo para vibrações derivadas de obras de construção publicado pelo Departamento de Transportes da Califórnia [6].

Nesta fase será necessário enumerar todos os equipamentos e atividades associadas à obra, fazendo-se uma estimativa dos valores de velocidade de vibração nos edifícios próximos de acordo com o planeamento temporal de funcionamento na obra e tendo em conta a localização dinâmica das fontes de vibração e emissão vibrátil em cada momento da obra. Os valores obtidos devem ser confrontados com a classificação dos edifícios de acordo com a sua provável reação à excitação mecânica transmitida pelo solo. Para este efeito é recomendada a utilização da metodologia descrita no Anexo B da norma NP ISO 4866 de 2021 [7].

No caso de utilização de explosivos, é necessário a definição das cargas máximas admissíveis, por determinação experimental, *in situ*, previamente em local sem afetação de estruturas. A carga explosiva máxima será definida, tendo em conta a posição relativa entre o local previsto para o desmonte a fogo e as estruturas/edifícios que se pretende proteger, e a não ultrapassagem dos limites de danos cosméticos em estruturas.

Adicionalmente em zonas urbanas, onde as obras de construção decorrem nas proximidades de edifícios, será necessário avaliar a incomodidade às vibrações dos respetivos habitantes, a partir de medições, e estabelecer níveis de alerta, com a consequente informação das populações. No que respeita ao ruído estrutural e em particular para obras em profundidade, poderá ser realizado um levantamento dos valores obtidos durante a monitorização de obras similares já realizadas, de modo a estabelecerem-se distâncias indicativas relativamente à frente de obra, para as quais podem começar a existir reclamações (devidas a obras em profundidade). Caso esta informação seja inexistente, poderão ser utilizados os valores limites de $L_A = 34$ dB [16-250 Hz], para o período diurno, e de $L_A = 26$ dB [16-250 Hz], para o período de entardecer. A obtenção do valor global é realizada pela afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequência de oitava, ou terço de oitava. Efetivamente, o valor indicado para o período diurno, corresponde ao valor do limiar de perceção da norma ISO 226, considerando-se a ponderação A, para as bandas de terço de oitava referidas. Será necessário estabelecer-se, por via experimental, as distâncias relativamente à frente de obra, a partir das quais estes valores não são ultrapassados, ou então utilizar informação decorrente de obras similares. Os recetores (ou conjunto de recetores representativos nessa zona assim determinada) devem ser objeto de monitorização contínua de vibração, e em caso de reclamação, realização e medições de vibração no interior de edifício (para aferir os valores limites de ruído estrutural). Admite-se que durante o período noturno, não existe atividade de construção, caso esta condição não possa ser ultrapassada, por questões de segurança, recomenda-se a monitorização contínua de vibração junto aos recetores sensíveis, de modo a possibilitar uma adequada gestão das operações indutoras de vibração e controlo da eficácia das medidas implementadas

2.2.2. Medidas de minimização

Considerando o cumprimento de regras de boa-prática, como por exemplo o ajustamento dos equipamentos e da potência mecânica associada, e/ou frequência de vibração, em função da proximidade, tipo de recetor e período do dia, de modo a que sejam cumpridos os limites estabelecidos para a velocidade de vibração nos pontos recetores. Nesta fase a definição das medidas de minimização, passam essencialmente pela interrupção da progressão da obra, e/ou modificação do processo de obra no sentido de reduzir os valores de vibração. As modificações poderão passar pela escolha de equipamento diferente, redução da “velocidade” de cada equipamento/processo, ou qualquer outra alteração que reduza a velocidade de vibração no solo. Outra possibilidade é a deslocação da população para novos edifícios não sujeitos a tais estímulos, em função dos resultados obtidos na monitorização e da sensibilidade das pessoas em causa. Refira-se, também a importância do esclarecimento dos residentes afetados sobre as atividades que irão decorrer, a sua correspondente duração, e também que as amplitudes de vibração serão monitorizadas por meio de medições, garantindo que os valores estão aquém das amplitudes de vibração que podem causar danos, antes da realização da obra.

2.2.3. Programa de monitorização: fase de construção

Este programa, usualmente inclui a realização de medição de vibrações (valor de pico, para avaliação de danos, e valores eficazes e/ou pico, para avaliação de incomodidade) em modo contínuo nos recetores expostos, previamente identificados, e durante o período em que os trabalhos a realizar se encontrem na sua proximidade. Simultaneamente com a realização de medições, deve existir um sistema de tratamento automático de dados e de envio de alertas no caso de as vibrações ultrapassarem os limites de alerta e/ou de alarme definidos. Sempre que se detetarem níveis de vibração que ultrapassem os limites definidos deve ser elaborado um relatório com a análise dessas situações e com a identificação das medidas já tomadas, e a tomar, para se garantir o cumprimento dos mesmos

2.3. Fase de exploração

2.3.1. Identificação de impactes

Para a identificação dos impactes associados à fase de exploração é necessário obter estimativas do nível de vibração e de ruído estrutural no recetor, e em toda a extensão da linha, não devendo ser negligenciados eventuais efeitos de amplificação derivados de fenómenos de ressonância das lajes dos pisos dos edifícios. No que respeita à previsão da vibração e ruído estrutural, considera-se a possibilidade de

recurso de 2 métodos distintos, um método avançado de simulação numérica, para a via em túnel, e um método de modelação mais simplificado, para o caso de vias em superfície. A única exceção a este procedimento, é o caso associado a edifícios com um substancial isolamento sonoro de fachada, como estudo de gravação, ou de instalações com equipamentos sensíveis, em que deverá ser utilizado o método avançado de simulação numérica, verificando-se:

Via à superfície:

Possibilidade de utilização de um método de previsão simplificado, designadamente a versão de 2018 do método da *Federal Transit Administration* [2], com ajustes relativamente à velocidade dos veículos, parâmetros e características dos veículos e via, ajustes associados à propagação, e recetor (atenuação piso a piso, ressonância dos pisos). Os resultados obtidos deveram ser validados por meio de medições experimentais, tendo em conta composições ferroviárias e vias-férreas semelhantes.

Via em túnel:

Neste caso é recomendável, a utilização de um modelo de simulação numérica avançado, incluindo também eventuais efeitos de amplificação advindos de fenómenos de ressonância das lajes dos pisos dos edifícios. Tendo em conta a incerteza das previsões será necessário a determinação das funções de transferência experimentais, (nos trechos em túnel), com o túnel praticamente finalizado, mas imediatamente antes da execução da solução de via-férrea, de modo viabilizar qualquer ajuste que se revele necessário no dimensionamento das medidas de minimização a implementar. A validação dos resultados para o ruído estrutural deverá ser realizada a partir de medições da velocidade de vibração, utilizando fatores de conversão entre a velocidade e os níveis sonoros derivados de abordagens simplificadas. Neste caso, recomenda-se a utilização, sempre que aplicável da metodologia indicada na norma ISO/TS 14837-31 [3], cujo domínio de validade já foi referenciado na introdução, e aplicando-se ao valor (valores por banda de oitava/terço de oitava) os valores de ponderação da malha A. Alias, sempre que possível, é recomendado a discretização dos valores por bandas de frequência, e aplicação dos pesos na malha A, para cálculo do nível sonoro.

Para o cálculo das funções de transferência entre a via e o edifício, poderá ser utilizado um martelo hidráulico perfurador para excitação/indução de vibrações verticais no ponto de impacto (interpondo entre o martelo e o solo uma pequena laje resistente a estes impactos), desde que se garanta a medição sincronizada de todos os acelerómetros utilizados [9]. As medições referenciadas deveram ser realizadas por um laboratório experiente na área (medições de vibração devido à circulação de tráfego ferroviário), com recurso a

acelerómetros de grande sensibilidade, tendo em conta as amplitudes do fenómeno a caracterizar, e utilizando os procedimentos de medição constantes na ISO/TS 14837-31 [3].

2.3.2. Medidas de minimização

Para o sistema de minimização de vibração adotado deve ser indicada a eficácia esperada, preferencialmente em bandas de terço de oitava, e as estimativas do nível de vibração e do ruído estrutural (caso de vias em profundidade), com e sem a adoção da medida, em função da frequência. A eficácia do sistema modelado, poderá ser validada experimentalmente segundo os métodos descritos na norma EN 17682:2022 [8]. Uma sùmula das medidas de minimização implementadas em Portugal pode ser encontrada na publicação [9].

2.3.3. Programa de monitorização: fase de exploração

Durante a fase de exploração, deveram ser realizadas ações de monitorização para o descritor vibração, devendo ser seguido o procedimento de medição estabelecido na norma ISO /TS 14837-31 [3]. O conteúdo dos relatórios de monitorização devem cumprir o estabelecido na versão atualizada e em vigor da Portaria n.º 395/2015 de 4 de novembro. Este programa, usualmente inclui a realização de medição de vibrações, espaçadas temporalmente, usualmente no ano de entrada em serviço, e depois com periodicidade quinzenal, e posteriormente de dez em dez anos, em recetores previamente identificados, ou então alvo de reclamação. Antes da entrada em funcionamento do empreendimento, deverá ser realizado um teste com as futuras composições e para os diferentes regimes de velocidade de circulação previstos, para se determinar as funções de transferência finais (incluindo a ação das medidas de minimização implementadas) e a avaliação da eficácia das medidas de minimização adotadas.

3 . MEDIÇÕES DE RUÍDO E VIBRAÇÃO

As vibrações induzidas pela passagem de composições ferroviárias são normalmente aferidas pela medição de aceleração. Para o efeito recorre-se a acelerómetros colocados no centro dos pavimentos dos compartimentos, medindo-se principalmente a componente vertical, e integrando os valores obtidos para o cálculo da velocidade de vibração. A aferição do ruído estrutural é realizada por microfones também localizados no centro do compartimento, na gama de frequências audíveis, neste caso entre os 16-250 Hz [3]. No entanto, devido as pequenas amplitudes associadas ao ruído estrutural, a sua medição é dificultada pelos efeitos de mascaramento de outros tipos de ruído aéreo, usualmente presentes no interior de um edifício (por exemplo, ruído de equipamentos coletivos do próprio

edifício, ruído exterior devido a outras fontes de tráfego). Muitas vezes, a avaliação do ruído estrutural, só poderá ser efetuada pelo cálculo, a partir da velocidade de vibração dos pisos e paredes do compartimento em avaliação, como indicado na ISO/TS 14837-31 [3]. Neste documento é realçado o facto de campo sonoro no interior dos compartimentos ser fortemente modal, e portanto, os valores medidos serem muito dependentes da posição do microfone. Outro aspeto a ter em consideração, é a minimização da propagação do ruído por via aérea devida à fonte, devendo-se optar por colocar os transdutores de medição nos compartimentos cujas fachadas não estejam diretamente expostas ao tráfego ferroviário, bem como cessar todas as fontes de ruído no interior do edifício que contribuam para o ruído residual. Nesta situação, a realização de medições simultâneas de ruído e vibração, apresenta-se como uma das possibilidades para a identificação do ruído específico decorrente da circulação ferroviária, principalmente em vias subterrâneas. A medição do ruído deve ser realizada na gama de medição em frequência compreendida entre 16 e 250 Hz, devendo-se registar o valor eficaz, valor máximo e o valor mínimo, de pelo menos, 5 passagens, para cada categoria de composições ferroviárias a uma velocidade que seja representativa do seu funcionamento, bem como o valor do ruído de fundo (neste caso, valor máximo), com ponderação no tempo “Slow”. Para cada passagem individual, o tempo de medição deve corresponder, pelo menos, a um decréscimo de 10 dB em relação ao nível máximo (seção 9.3.2.3 da NP ISO 1996-2:2021) [10].

Para a fase de exploração, as empresas (ou laboratórios) que realizem medições de vibração devem cumprir o disposto nas normas ISO 14837-31 [3], ISO 2631-2 [11] [e ISO 5348 [12], fazendo uso de transdutores de medição (preferencialmente acelerómetros, tendo em conta as pequenas amplitudes de vibração) com sensibilidade adequada, associados a uma cadeia de medição que indique os resultados obtidos em bandas de terços de oitava (preferencialmente), valores eficazes globais, e histórico da evolução do sinal em função do tempo. As cadeias de medição e transdutores utilizados devem ser calibrados, nas gamas de medição adequadas ao ensaio a realizar. A acreditação dos ensaios segundo estas normas é um fator preferencial, caso contrário, deverá demonstrar experiência na área. Os resultados obtidos deverão ser consubstanciados num relatório de ensaio com indicação do nome do laboratório, resultados, indicação das fontes vibráteis presentes, tempo de medição (data, início e final da medição), georreferenciação das medições efetuadas, e fotografias da localização dos transdutores de medição.

Para a fase de construção, as empresas (ou laboratórios) que realizem medições de vibração devem cumprir o disposto nas normas NP 2074 [12], ISO 4866 [7] e ISO 5348 [13] e preferencialmente serem acreditadas para a realização de ensaios segundo estas normas. A cadeia de medição e os

transdutores utilizados devem ser calibrados, nas gamas de medição adequadas ao ensaio a realizar.

4. CRITÉRIOS DE ADMISSIBILIDADE

No que respeita à resposta humana as vibrações, as reclamações devidas à exposição a vibrações em edifícios, possam ser despoletadas pelos ocupantes dos edifícios quando a amplitude das vibrações é ligeiramente superior aos níveis de perceção. Existem muitos outros fatores (sociais, ambientais, pessoais), que podem moderar esta resposta. Para perturbações temporárias, ou de eventos transitórios, como por exemplo, as que ocorrem durante a fase de construção, a amplitude das vibrações pode ser significativamente superior ao limite da perceção, sendo bem tolerada pela população. Igualmente a norma NP ISO 2631-2: 2022 [14], indica na seção 5, sobre a resposta à vibração humana em edifícios, que “existem situações em que amplitudes significativamente elevadas podem ser toleradas, particularmente para perturbações temporárias e acontecimentos transientes. Exemplo são os projetos de construção”. Contudo, devido à necessidade de valores limites para a condução dos EIA (Estudos de Impacto Ambiental), apresentam-se de seguida, uma recomendação para os valores limite de vibrações e ruído estrutural, tendo em conta a cronologia dos eventos, ou seja, Fase de Construção e Fase de Exploração, e nesta última subdividindo-se as recomendações para Via em túnel e Via à superfície. Sempre que possível recorreu-se a valores normativos (mesmo que a referida norma apresente uma edição mais recente, por exemplo a versão de 1989 da ISO 2631-2 [15].

4.1 Fase de construção

4.1.2 Critério de danos

Devem ser observados os critérios de dano recomendados pela NP 2074:2015 [12], para a velocidade de vibração (valores de pico), definidos em função das frequências dominantes registadas, f , e do tipo de estrutura, de acordo com o disposto na Figura 1: A classificação das estruturas deve ser efetuada de modo conservador, devendo ser reportada à classificação previamente realizada na Fase de Construção (tendo como base a NP ISO 4866) [7].

Tipo de estrutura	Frequência dominante, f		
	f ≤ 10 Hz	10 Hz < f ≤ 40 Hz	f > 40 Hz
Sólidos	1,5	3,0	6,0
Concretos	3,0	6,0	12,0
Prefabricados	6,0	12,0	40,0

Figura 1. Valores limite recomendados para a velocidade de vibração (de pico), em mm/s

Existem atividades e equipamentos que requerem condições com valores muito limitados de vibração, muitas vezes inferiores aos valores de velocidade de vibração que são diretamente percebidos pelo ser humano. Exemplos deste tipo de atividades são as salas onde decorrem microcirurgias, laboratórios científicos com atividades de investigação nos domínios da ótica e microbiologia, e uma variedade de processos industriais, como por exemplo as indústrias de componentes avançados para circuitos integrados. Quando não existem limites para a velocidade de vibração admissível por parte dos locais onde estes equipamentos estão instalados, é aconselhável investigar detalhadamente as condições reais e os requisitos exigíveis. Podem ser realizados ensaios preliminares e respetiva monitorização de modo a estabelecer-se um procedimento adequado para o trabalho. Alternativamente, os critérios de vibração podem ser estabelecidos por meio de discussão com o fabricante, fornecedor ou operador. Quando não existe informação específica, é possível fazer referência a informações de outras fontes, como experiência anterior ou informações publicadas, como por exemplo o Quadro B1 da BS 5228-2: 2009+ A1 2014.[5].

4.1.3 Critério Incomodidade

Máquinas e Atividades sem componentes impulsivas.

No caso deste tipo de equipamentos, ou atividades, a percepção de vibrações no interior dos edifícios deve ser avaliada em termos de valor eficaz médio da velocidade de vibração. Para o efeito, recomendam-se os valores de referência indicados na Figura 2, em que a vibração possa ser considerada “Perceptível, suportável para pequena duração”, e apenas para período do dia (8h-20h). No período complementar, a geração de vibrações deve estar condicionada, salvo situações de força maior e de carácter excepcional, à implementação de medidas de proteção/gestão de ações e/ou de proteção de pessoas e bens, que minimizem a exposição às vibrações. Sabendo-se que nos edifícios residenciais os indivíduos apresentam uma grande variabilidade de tolerância à vibração, dependente de fatores não físicos, recomenda-se como valor limite, os valores de velocidade de vibração mais elevados (ou seja, 0,28 mm/s). Para a fase de construção, optou-se por selecionar valores de referência globais, e não em função da frequência, uma vez que a maior parte das estimativas de vibração associadas as fontes vibráteis usualmente utilizada, não apresentam valores discriminados em função da frequência.

vel (mm/s)	Sensação
vel < 0,11	Não
0,11 < vel < 0,28	Perceptível, suportável para pequena duração
0,28 < vel < 1,10	Não, incómoda, podendo alterar as condições de trabalho
vel > 1,10	Muito não, muito incómoda, realçando as condições de trabalho

Figura 2. Valores limite para a percepção da vibração continuada no interior de edifícios

Máquinas e Atividades com componentes impulsivas.

No caso deste tipo de equipamentos ou atividades, tendo em conta o carácter impulsivo das ações vibratórias presentes, preconiza-se que a análise a realizar esteja diretamente associada à avaliação da vibração em termos de valores de pico. Para o efeito, deverão ser observados os valores contantes no Quadro III (adaptado da tabela B1 da BS 5228-2:2009+A1:2014) [5], para a gama espectral situada entre 1Hz e 80 Hz, respetivamente:

vel (mm/s)	Sensação
vel < 0,14	Não
0,14 < vel < 0,30	Perceptível, suportável para pequena duração
0,3 < vel < 1	Não, incómoda, podendo alterar as condições de trabalho
1 < vel < 10	Suportável para pequena duração
10 < vel	Não tolerável

Figura 3. Valores limite para a percepção da vibração no interior de edifícios

Considerando a grande variabilidade de tolerância à vibração em edifícios e analogamente ao caso das máquinas e atividades sem componentes impulsivas, recomenda-se como valor limite, os valores de velocidade de vibração mais elevados (ou seja, 0,3 mm/s).

Caso exista a necessidade de ultrapassagem destes valores (por motivos de segurança da obra, por exemplo), deverá esta situação ser complementada com a indicação do estabelecimento de um programa adequado de comunicação com os habitantes. Este programa poderá incluir anúncios e/ou sinais de alerta com informação sobre os períodos de ocorrência de valores mais elevados (mas sempre inferiores aos critérios de dano nas edificações)

No caso da existência de explosões durante a fase de construção, é recomendado a utilização dos valores limites contantes na norma ISO 2631-2 (edição de 1989) [14], onde são publicados os valores admissíveis no caso de explosões, em função da frequência, e para os distintos tipos de edifícios (residenciais, escritórios, industriais), tendo em conta o número de explosões a efetuar. A opção da utilização desta versão desatualizada (a versão mais recente não apresenta valores limites) está relacionada com o histórico da sua utilização no passado em Portugal, principalmente no sector das minas.

4.1.4 - Ruído estrutural

Como foi referido em 2.2.1, e em particular para obras em profundidade, poderá ser realizado um levantamento dos valores obtidos durante a monitorização de obras similares já realizadas, de modo a estabelecer-se distâncias indicativas relativamente à frente de obra e para as quais começaram a existir reclamações. Caso esta informação seja inexistente, poderão ser utilizados os valores de referência $L_A = 34$ dB [16-250 Hz], para o período diurno, e de $L_A = 27$ dB [16-250 Hz], para o período de entardecer

4.2 Fase de exploração

4.2.1 Vibração

Para a avaliação da incomodidade induzida por vibrações continuadas ou de natureza intermitente no interior das edificações, recomendam-se, no período de exploração da infraestrutura, os seguintes critérios:

1. Valor eficaz médio da velocidade de vibração menor que 0,28 mm/s;
2. Aplicação da curva base da ISO 2831-2 (versão de 1989), com os fatores multiplicativos correspondentes às vibrações intermitentes para edifícios residenciais, para o período diurno e noturno, utilizando a curva combinada (caso em que as posições dos ocupantes podem variar no edifício)

Neste caso o espectro de valores eficazes da velocidade de vibração, por bandas de terços de oitava, deve ser inferior a 0,14 mm/s, para frequências centrais entre os 8 e 80 Hz (período 20h-08h), e entre 0,2 e 0,4 m/s, para frequências centrais entre os 8 e 80 Hz (08-20h).

Tendo em conta que a curva de exposição às vibrações utilizada, é a curva combinada apresentada na norma, e corresponde, para as frequências de interesse (8 – 80 Hz), a valores de velocidade de vibração na direção horizontal, como também na vertical, não se faz, para este descritor, a distinção entre vias à superfície e vias em túnel, até que um estudo sobre a incomodidade à vibração, específico tendo em conta o comportamento das construções típicas portuguesas, possa aligeirar, os valores de velocidade de vibração par as vias em superfície.

4.2.2 Ruído estrutural

Para efeitos da previsão do ruído estrutural que se possa estabelecer em compartimentos de edifícios expostos (nomeadamente habitações), tendo em consideração a especificidade da situação em análise (ruído e vibrações induzidas pela circulação de tráfego ferroviário), recomenda-se, para cada passagem, para o valor eficaz médio da velocidade de vibração, integrada nas bandas de frequência central situadas entre 16 Hz e 250 Hz, o seguinte:

Via em túnel

Tendo a conta que a área do ruído de baixa frequência, apresenta uma complexa diversidade humana, relativa ao valores limites, bem como a experiência dos autores na análise de reclamações devido a ruído estrutural, com a realização simultânea de medições de ruído e velocidade de vibração, optou-se pela utilização dos valores de percepção, em função da frequência, correspondente a 10% dos indivíduos mais sensíveis [16]. Assim, em termos de nível sonoro L_A (com afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequência de terço de oitava compreendida entre os 16 Hz e 250 Hz), recomenda-se a utilização do valor $L_A = 26$ dB [16-250 Hz] dB, correspondendo em média a um valor de velocidade de vibração de 0,03 mm/s .

Via a superfície

Tendo em conta que a diferença entre os valores limites para a velocidade de vibração entre as direções vertical e horizontal, corresponde sensivelmente, em termos de nível sonoro L_A (com afetação dos pesos da malha A, em cada banda de frequência de terço de oitava compreendida entre os 16 Hz e 250 Hz) a 10dB, o valor limite anterior, é acrescido do mesmo valor correspondente. Para esta situação, recomenda-se o valor $L_A = 36$ dB [16-250 Hz] dB.

5 . CONCLUSÕES

Espera-se que a aplicação desta atualização do guia de atuação metodológica para a minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade à vibração e ruído estrutural no interior das residências, possa contribuir para uma harmonização de procedimentos de atuação, no âmbito dos estudos de impacte ambiental.

No âmbito de estudos de avaliação de incomodidade, consideram os autores importante o estabelecimento de questionários de referência, para aferição da incomodidade induzida pelas vibrações e ruído estrutural (quer para a fase de construção como exploração), categorizado por tipologia do edificado, principalmente nos casos em que existem reclamações. O tratamento destes dados, no âmbito nacional permitiria o reajuste dos critérios de admissibilidade.

REFERENCIAS

- [1] ISO 14837-1:2015, “Mechanical vibration- Ground-borne noise and vibration arising from rail systems: Part 1: General guidance, International Organization for Standardization , Geneva, Switzerland, 2015.
- [2] Vople, and al. “Transit Noise and Vibration Impact Assessment.”,FTA Report No. 0123, 2018.

- [3] ISO 14837-1:2017, “Mechanical vibration: Ground-borne noise and vibration arising from rail systems Part 31: Guideline on field measurements for the evaluation of human exposure in buildings”, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [4] PORTUGAL, Leis, Decretos-lei, etc., Regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental, Decreto-Lei n.º 152-B/2017, de 11 de dezembro.
- [5] BS 5228-2:2009+A1:2014, Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 2: Vibration, British Standards, 2014
- [6] Andrews J.; Buehle, D.; Harjodh, G., “Transportation and Construction Vibration Guidance Manual, Report CT-HWANP-RT13-069.25.3, California Department of Transportation, 2013.
- [7] NP ISO 4866:2021, “Vibrações mecânicas e choques. Montagem mecânica de acelerómetros, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2021
- [8] EN 17682:2022, “Railway Applications - Infrastructure - Resilient Element For Floating Slab System, European Committee for Standardization, Brussels, 2022.
- [9] Antunes, Sónia, Patrício, J., “Metodologia para minoração da ocorrência de potenciais situações de incomodidade ao ruído e vibração no interior de residências decorrentes da circulação do Metro”, 2º Simpósio de Acústica e Vibrações, Coimbra, Portugal, 24 de maio, 2019.
- [10] NP ISO 1996-2:2021, “Acústica; Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente Parte 2: Determinação dos níveis de pressão sonora, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2021.
- [11] ISO 2631-2:2003, “Mechanical Vibration And Shock - Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration - Part 2: Vibration In Buildings (1 Hz To 80 Hz), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [12] NP 2074:2015, “Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas”, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2015.
- [13] ISO 5348:2021 Mechanical vibration and shock-mechanical mounting of accelerometers, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2021.
- [14] NP ISO 2631-2:2022, “Vibrações mecânicas e choque Avaliação da exposição do corpo inteiro a vibrações Parte 2: Vibrações em edifícios (1 Hz a 80 Hz)”, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2022.
- [15] ISO 2631-2:1989, “ Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration - Part 2: Continuous And Shock-Induced Vibrations In Buildings (1 To 80 Hz)”, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [16] Leventhall, G. , Pelmear, P., Benton, S., “A Review of Published Research on Low-Frequency Noise and its Effects”, Report for Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), London, 2003.

PERFORMANCE OF BUILDING BASE ISOLATION: THE TWO-LEVEL APPROACH

Iñigo Arana Goenaga^{1}*
Albert Isnardo Iglesias²
Amadeu Segura Torres²
Pere Vicenç Rodríguez Sorribes²
Hamid Masoumi³
Amina Aïssani³

¹CDM Stravitec, Barcelona, España

²ICR, Ingeniería para el Control del Ruido S.L., Barcelona, España

³CDM Stravitec, Overijse, Bélgica

RESUMEN

Es habitual observar niveles importantes de ruido estructural dentro de edificios adyacentes a nudos de transporte. Para construcciones nuevas, el uso de sistemas de Aislamiento Estructural/Basal de Edificios (BBI, de sus siglas en inglés) es una solución con una buena relación costo-eficacia para mitigar la propagación de vibraciones provenientes del terreno.

En la práctica, la elección del sistema BBI depende principalmente del requerimiento acústico prescrito por el consultor vibroacústico. Se prescribe la frecuencia de resonancia a alcanzar, según las mediciones in situ y los modelos numéricos de predicción que permiten estimar el nivel de ruido estructural esperado dentro del edificio. De todos modos, la decisión se toma muchas veces con base en el pico de frecuencia observado. Una vez designada la frecuencia de resonancia, se realiza el diseño del sistema de aislamiento en función de los mapas de cargas.

En este artículo se analiza tal metodología tradicional y, basándose en un caso real, se analiza críticamente el rendimiento global de aislamiento, no solamente a la frecuencia de pico sino considerando el comportamiento real del edificio y la posibilidad de resonancias tras la implementación del aislamiento estructural.

Palabras clave: Building Base Isolation, vibraciones, ruido estructural, aislamiento.

ABSTRACT

In buildings close to transit hubs, it is common to observe important levels of structure borne noise inside the buildings.

For new constructions, the use of a Building Base Isolation (BBI) is a relatively cost effective solution to mitigate the ground-borne vibrations propagating in the building.

In practice, the choice of the BBI system depends principally on the acoustic requirements proposed by the acoustic consultant. The resonance frequency to be achieved is prescribed following different in-situ measurements and a numerical modelling which allows an estimation of the level of structure-borne noise expected in the building. However, the main decision is very often based on the peak frequency observed. Once the resonance frequency is set, a design of the isolators is then proposed based on the load scheme.

This paper discusses the traditional approach and based on a real case study, the overall performance of the isolation is critically analyzed not only at peak frequency, but also taking into account the real building behavior and the possibility of resonances after the BBI implementation.

1. INTRODUCCIÓN

Buildings, especially near railway or subway networks, can be subjected to ground-borne vibrations resulting in unacceptable level of structure-borne noise and vibration for the occupants of the building. In order to protect a building from important ground-borne noise and vibrations, it is necessary to decouple the building from the surrounding noise and vibration sources, by introducing a building base (vibration) isolation solution [1].

In 2017, the owner of a residential building project, located in Gran Vía Street in Barcelona, has contracted an acoustic consultant to investigate whether the heavy railway infrastructure of the Generalitat of Catalonia (FGC), passing

* *Autor de contacto:* i.arana@cdm-stravitec.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

close to the building, could generate important levels of noise and vibrations in his building. Figure 1 shows the location of the building and its distance from the FGC railway tunnel.

This paper will make use of this case study to describe the procedure adopted to investigate the need for a BBI system but also to discuss the performance of the isolation used based on the results of a measurement campaign carried out at the end of the construction.



Figure 1. Location of the building and its distance from the railways.

In Spain, in this case of study, in Catalonia in particular, all buildings need to comply with the regulation 16/2002 on the protection against noise pollution and appendices modified according to *Decree 176/2009*, which specifically approves the regulations of the law regarding vibrations generated by *the passage of passenger trains*.

This regulation provides the Law immission limit levels depending on the intended use of the building as follows:

Table 1. Law imposed limits by the Law 16/2002.

Intended use of the building	L_{aw} [dB]
Residential	75
Hospitals	72
Educational/Cultural buildings	72

The building being a residential building, the maximum allowable L_{aw} was set to 75dB.

2. DESCRIPTION OF THE CASE STUDY

The residential tower building, used as a case study in this paper, consists of a multi-storey residential building (Figure 2). It is located in GRAN VIA Street, in Barcelona close to tunnel Lines L8, R5 and R6, among others of the railways of

the Generalitat of Catalonia (FGC) at the height of the Magoria La campana stop.

Figure 2 below provides a cross section of the building at the height of the tower and a cross section of the different floor types.

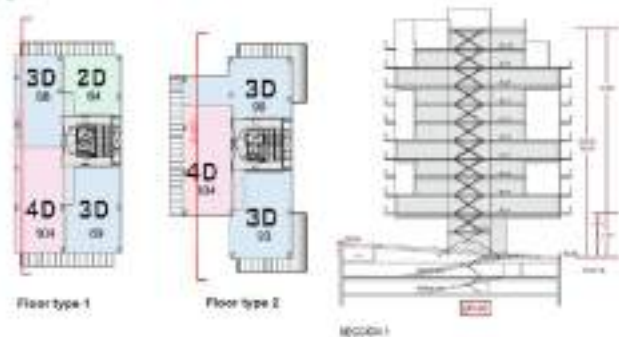


Figure 2. Cross section of the Building and Floor types.

3. NOISE AND VIBRATION STUDY

The objective of the noise and vibration study was to investigate whether despite the heavy railways passing close by, the building could comply with the limits imposed with the law 16/2002, according to *Decree 176/2009*.

In this respect, the acoustic consultant has initiated a measurement campaign at the construction lot determine the level of vibrations which will be received by the building.

3.1. Measurement campaign :

The measurements have been carried out at different points of the construction land in order to take into account possible differences in ground vibration. Differences which could be linked to different parameters, such as differences in the distance relative to the railway tunnel, or differences in the soil composition all along the vibration propagation path, the speed of the trains, irregularities present in the tunnel, etc.

Figure 3 shows the location of the different measurement points vis à vis the railway. Five points were located along the surface area occupied by the building, to control the vibration reduction. These five points were considered enough to cover all the analyzed area, locating the P1 the closest to the tunnel, considering it the worst case.

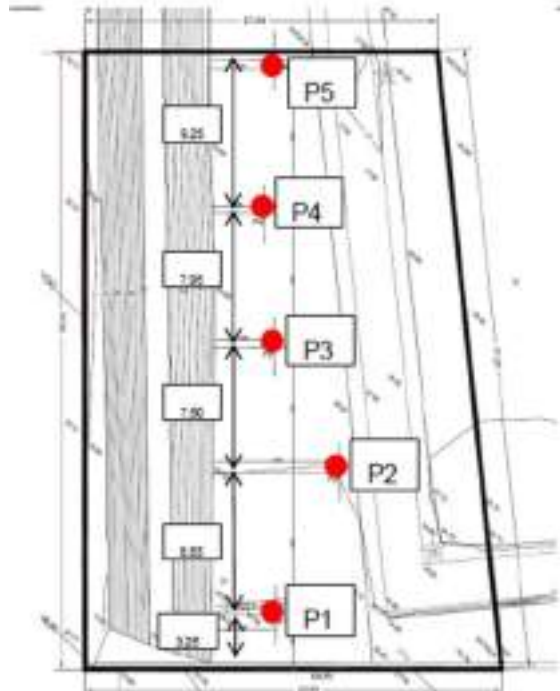


Figure 3: Location of vibration measurement points

All the measurements have been carried out on December 31, 2015 between 9 am and 1pm. This period was chosen because it corresponds to the peak period for train passings by. A train passing by is detected approximately every 3-5 minutes.

3.2. Measurement equipment

The equipment installed in the different vibration locations is detailed as follows:

Table 2. Measurement equipment

Equipment	Model
5 x Integrating third octave sound meter. Class 1. CESVA	SC310
5 x Accelerometer CESVA. Sensitivity 1000 mV/g	AC 006

The CESVA SC310 is a Class 1 equipment that acquire acceleration time-signals and contain internally the post-process of the Maximum Transient Vibration Value, MTVV, according to ISO 2631-2 standard as well as the average spectra. After that, an additional post process was carried out to obtain the MTVV modulus of the three axes (XYZ).

3.3. Measurement results :

In different measurement locations, a time evolution of the vibration level has been collected and processed to evaluate the evolution of L_{aw} .



Figure 4. Measurement equipment installed

As an example, Figure 5. Shows the time evolution of L_{aw} in the P1 location (the worst case). Where we can clearly identify that the maximum L_{aw} level due to the passing train at point P1 is 81.8 dB, identified with a yellow mark.

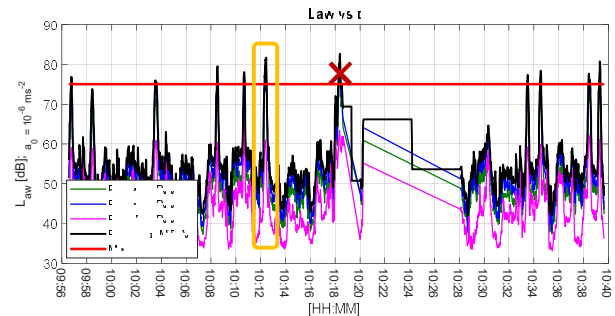


Figure 5. Measurements at P1. Note: between 10:20 and 10:30, the hollow refers to an event not related to the train passage – here a crane movement onsite.

Table 3. L_{aw} measured and estimated in each measurement point.

Measurement point	L_{aw} measured [dB]	L_{aw}^1 [dB]	L_{aw}^2 [dB]
P1	81.8	73.2	79.2
P2	77.6	69.4	75.4
P3	74.6	64.8	70.8
P4	70.7	62.9	68.9
P5	65.4	56.4	62.4

¹ Estimation including only the attenuation due to soil/building coupling.

² Estimation including the soil/building coupling loss and the penalty due to the slab resonance.

As expected, we can notice that different levels have been obtained in the different measurement points, as indicated in the 2nd column of Table 3.

At this point, a correction need to be applied to estimate the vibration inside the building as follows :

1. Attenuation due to the coupling soil/building :

In order to estimate the attenuation due to the soil/building coupling, it is necessary to know the spectrum of the ground vibration due to the passage of the trains and the type of foundations which will be used. In this specific case, the client indicated that the foundations were concrete piles.

The Figure 6 below, shows the attention applied for each frequency band according to FTA [2].

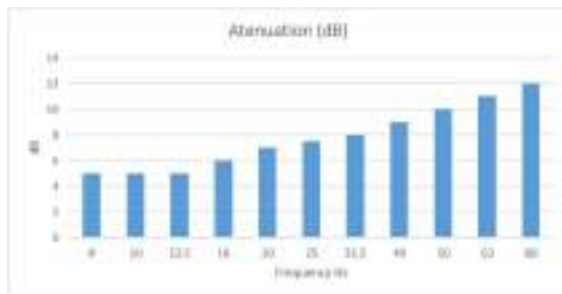


Figure 6. Attenuation due to the soil/building coupling.

After applying the attenuation for each of the frequency bands and for the typical spectrum obtained at each measurement point, the estimated levels of L_{aw} are indicated in the 3rd column of Table 3.

2. A penalty for the resonance of the slab, wall or support:

Once the attenuation due to the soil/building coupling has been considered, it is now necessary to take into account the possibility of resonance of a slab, wall or supports in one of the upper floors, which may result in higher vibration levels. According to FTA [2] and the return of experience of the acoustic consultant, the amplification due to a resonance can reach 6 dB in most critical cases. By assuming this worst case scenario, the estimation of L_{aw} in different measurement points is indicated in Table 3, column 4.

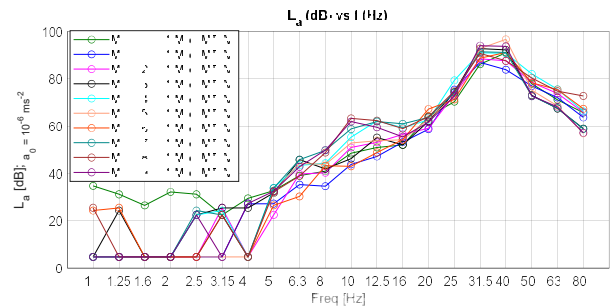


Figure 7. MTVV spectrum (XYZ) at the time of maximum level of train passing by.

3.4. Conclusions:

It is not possible to measure directly L_{aw} inside the different apartments, therefore an estimation is made based on vibration measurements conducted on the construction site.

Following the test campaign carried out and the post processing of the information obtained, it has been noticed that the expected vibration values, at some of the measurement points, were above the limit values established by the regulations (see table 3), which is in this case 75dB. In this respect, the acoustic consultant proposed to integrate an anti-vibration solution to reduce the level of vibrations.

4. INTEGRATION OF A BUILDING BASE ISOLATION

In a building base isolation strategy, it is important to consider all the connection points to the building, whether it's the soil on where the building stands (vertically and horizontally) or any existing construction which will be connected to the building. In the specific case of the presented building, the vibrations were transmitted via the soil only, as no adjacent buildings were to report.

Based on the measurement campaign results, the vibration index L_{aw} was compared in each measurement point to the limit imposed by the regulation (75 dB). It appeared that the limitation was not respected in some of the measurement points and a vibration isolation strategy was required to reduce the vibrations levels by 10 dB.

Following numerous exchange with the BBI supplier and the structural engineer, it has been decided to isolate the building at different levels because of the adopted structural design.

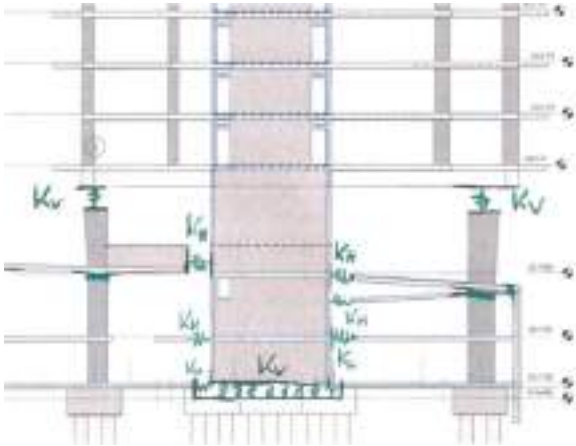


Figure 8. Isolation strategy.

Figure 8 shows where the isolation will be integrated, specifically :

1. Adding isolators on top of pillars below the 1st floor.
2. Adding isolators vertically and horizontally at the core walls in the basement (level -2). See Figure 9.
3. At slab level: cut the slabs and Insert corbels to support the slab. The corbels will then be decoupled from the slab using an isolator. See Figure 10.

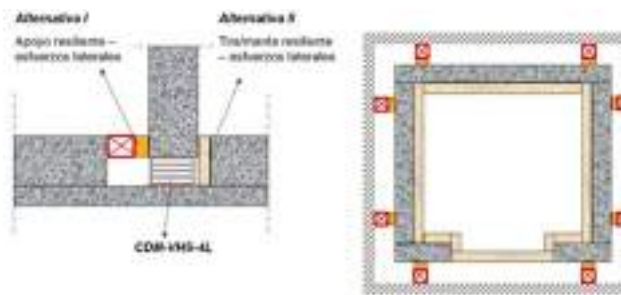


Figure 9. Proposed isolation for the core walls.

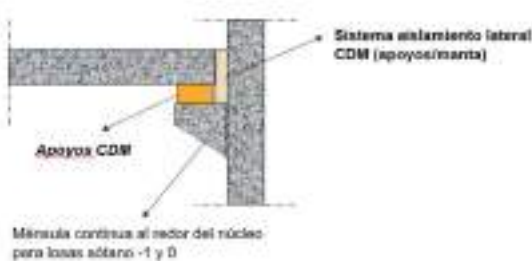


Figure 10. Proposed isolation for the slab connections.

4.1. Choice of Isolators :

The choice of the isolators will depend on the dynamic response of the isolators to the disturbance. With an understanding of its properties, the type of isolator is then chosen for the load it will support and the dynamic conditions under which it will operate.

The ratio of vibrations transmitted after the isolation is described as transmissibility and the maximum transmissibility of an isolator occurs at resonance.

In this specific case, the estimated L_{aw} was at 80dB and the peak frequency at 31.5Hz. Therefore, using the transmission loss formula, it has been estimated that an elastomeric vibration isolation system of 10Hz would easily allow the attenuation needed of 10 dB.

Based on the level of the vertical loads and the limited footprint area, the Very High Stress - VHS sandwich bearings² have been proposed to isolate the core walls and the column heads. Moreover, the client has requested his design team to include failsafes (additional safety measures) in the event of major accidents (such as fires, explosions, etc).

In this regards, after numerous discussion with the design team, the manufacturer of vibration isolation has recommended the use of bearings with integrated failsafes, as shown in Figure 11. The steel failsafe does not engage unless that bearing stability is compromised.



Figure 11. Installation of the VHS (very high stress) bearings with integrated failsafes.

² These VHS sandwich bearings refer to **Very High Stress** bearings and consist of an alternance of steel plates and elastomeric sheets which allow to sustain higher loads than traditional elastomeric bearings, in a limited footprint area.

4.2. Performance of the vibration isolation :

Following the completion of the project, the acoustic consultant went back to the construction site to evaluate the performance of the vibration isolation. A measurement campaign has been carried out and different measurement points have been selected in the building in the floors 1, 3 and 5 respectively. (Figure 12)

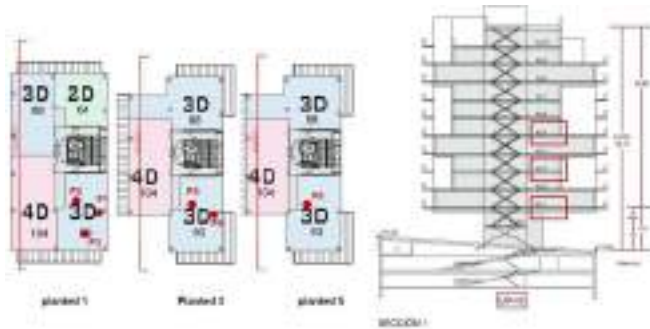


Figure 12. Location of the vibration measurement points in the building.

Figure 13. below shows the time evolution of the vibration levels at the different measurement points. The vibration spectrum of the maximum peak detected at all the measurement points of floor 1 and 3, is shown in the Figure 13 below.

In Figure 13, we can clearly notice how the vibration levels measured around this range have been reduced considerably; from 16Hz the levels oscillate between 50 and 60 dB.

The measurements results show that the isolation was effective and achieved the expected performance. Table 4. below shows the measured L_{aw} in the different measurement locations. All measurements confirmed that the limits imposed by the regulation are respected.

Note : The peak at around 10 Hz reflects the isolation frequency of the isolation system.

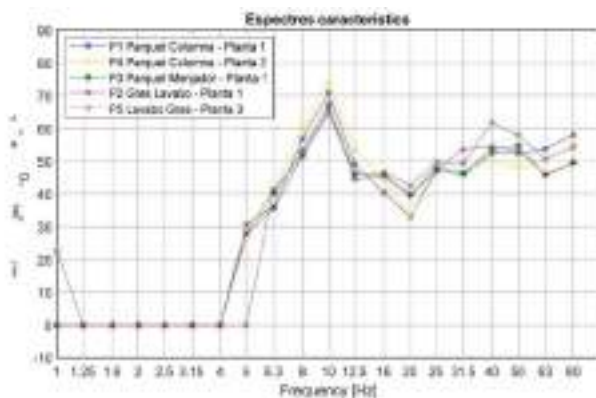


Figure 13. Spectrum of the averaged vibration inside the building above of the vibration isolation system.

Table 4. Measurement of L_{aw} after integrating the Building Base Isolation solutions.

Measurement point	L_{aw} [dB]
Internal - P1	64.3
Internal - P2	58.5
Internal - P3	60.6
Internal - P4	66.9
Internal - P5	60.4

5.CONCLUSION

The choice of the Building Base Isolation system strongly depends on the acoustic performance required by the acoustic consultant, but has also primarily to comply with all structural requirements.

This paper presented a real case study highlighting that complying to both acoustic requirements and structural requirements is not contradictory. The vibration isolation proposed in this case study integrated an additional failsafe inside the solution to avoid any disproportional collapse in the event of explosions, fires, or any other accidental event. At the end of construction measurements have confirmed that the integrated failsafe does not compromise in any manner the expected performance and provides an additional safety measure.

12. REFERENCES

- [1] I. Arana, J. Cardona, B. Noori, H. Masoumi and A. Aïssani, "Impact of different types of building structures on the efficiency of Building Base Isolation: Real case study", Tecniacústica, 2022.
- [2] Transit Noise and Vibration Impact Assessment. Federal Transsit Administration (FTA), USA. 2006.



STUDY OF DISCRETIZATION SCHEMES FOR A HYBRID METHODOLOGY FOR THE ASSESSMENT OF GROUND-BORNE NOISE IN BUILDINGS

Robert Arcos Villamarin^{1,2*}
*Paulo Jorge Brochado Soares*³
Arnau Clot Razquin^{1,2}
*Kenny Fernando Conto Quispe*²
*Pedro Alves Costa*³
*Luís Godinho*⁴

¹Serra Húnter Fellow, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Terrassa, España

²Acoustical and Mechanical Engineering Laboratory (LEAM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Terrassa, España

³CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), University of Porto, Porto, Portugal

⁴ISISE, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal

ABSTRACT

In this article, a hybrid experimental/numerical methodology for the assessment of ground-borne noise and vibration in buildings to be constructed close to ground vibration sources is studied in a three-dimensional context. This methodology is based on three steps: First, the free field response due to the incident wave field induced by a particular ground vibration source is measured at the collocation points. Second, a set of virtual forces that equivalently represent the free field response induced by that incident wave field is then calculated. Finally, this set of virtual sources is applied to a structure-soil model to determine the response of the structure. In this paper, synthetic measurements are used to study different aspects related to the discretization strategies to be adopted to ensure accurate performance of the method. Specifically, two schemes for the distribution of virtual sources along the auxiliary surface are studied. Also, an exploration regarding the minimum number of collocation points that allows for a proper characterization of incident wave fields in the presence of shallow foundations is also presented. Of special relevance is the included discussion about sensor setup requirements for in situ experimental campaigns.

Keywords – Ground-borne vibration, Railway-induced noise and vibration, Building acoustics.

1. INTRODUCTION

Due to the switch of urban railway infrastructures from at-grade to underground space, railway-induced ground-borne noise and vibration is nowadays a stronger public concern than airborne noise. Many countries all around the world have established regulations (or are about to) for the maximum ground-borne vibration and re-radiated levels that can be reached in buildings nearby of a railway infrastructure. These regulations are set mainly to control the annoyance to the building inhabitants, but also to ensure the correct operation of sensitive machinery and equipment and, eventually, to avoid any building damage. One of the most common situations in which a railway-induced noise and vibration assessment study is required is when a new building is planned to be constructed near an existing and operational urban railway line. In such cases, the railway line administration or the city council usually demands a study that certifies that the maximum railway-induced ground-borne noise and vibration levels that will be achieved in the future building will comply with the applicable noise and vibration regulations. Thus, in those situations, prediction models of the railway-induced ground-borne noise and vibration levels inside buildings are required.

In order to reduce the uncertainty of full theoretical modelling strategies such as [2], hybrid modelling based on the combination between *in situ* experimental data and a theoretical model is an interesting alternative [5]. Moreover, hybrid strategies also offers benefits in terms

of computational and engineering cost compared with reliable fully theoretical models. In the framework of hybrid modelling for soil-building dynamic interaction problems, Auersch [6] presented a semi-empirical model that combines pre-calculated results obtained from detailed numerical models, a database of experimental data build from several experimental measurements and several specific analytical models. Sanayei et al. [7] proposed a hybrid approach where buildings are modelled by finite axial rods with added floor impedance obtained from infinite thin plate models, and where the incident wave field is represented by previously known column base forces or measured vibrations at the loading dock floor. More recently, López-Mendoza et al. [8] have presented a computationally efficient model based on modal superposition to predict the ground-borne railway-induced vibration levels in buildings considering SSI. The methodology is designed, specifically, for cases where the incident wave field is known, because it is previously computed numerically or because it is measured in the ground surface. This model accounts for the SSI by adding spring and damper elements to the foundation of the building model. In a more recent work, these authors presented an even faster model that uses a 3D time-domain FEM approach for the structure modelling and more elaborated spring-damper elements to account for the SSI [9]. Kuo et al. [10] presented a hybrid model that combines recorded data and numerical predictions considering the definitions proposed by the United States Federal Transit Administration [11]. In this work, the source, propagation and receiver mechanisms are uncoupled. More recently, Arcos et al. [12] presented a novel methodology for the prediction of ground-borne vibration induced by traffic in operational urban railway lines in buildings (or other structures) to be constructed in the surroundings of these railway infrastructures. The proposed approach is constructed on the basis of the method of fundamental solutions (MFS) and consists of three steps: incident wave field evaluation at a set of measurements points (collocation points), incident wave field virtualization by a set of virtual forces and building structure response determination applying the set of virtual forces to a coupled soil-structure theoretical model. Using synthetic data instead of experimental measurements on the ground surface, the methodology was numerically validated for the general problem of a two-storey building with shallow foundations at the surroundings of an underground railway line in both two-dimensional and two-and-a-half-dimensional contexts.

In the present paper, the method proposed in [12] is numerically studied in a three-dimensional (3D) framework to explore two important discretization aspects: the distribution of virtual sources as well as collocation points. In

both cases, the excitation is assumed to be a vertical harmonic point load applied on the ground surface, showing the capabilities of the methodology in a general ground vibration problem induced by an arbitrary source. Two different schemes for the distribution of virtual sources along the auxiliary surface are studied in the framework of free-field responses. Regarding collocation points, the methodology is tested using quite less collocation points than virtual forces, demonstrating a good performance when the amount of collocation points is enough to catch out the behaviour of the ground surface at the particular areas where the shallow foundations will be installed.

2. METHODOLOGY

In this section, the hybrid methodology for the prediction of railway-induced ground-borne vibration in buildings to be constructed near to urban railway lines presented in [12] is revisited. This proposed hybrid methodology poses the inverse problem of determining a virtual traction field that dynamically mimics the effect of an incident elastic wave field in the soil only considering ground surface measurements. The MFS is used in this approach to deal with this inverse problem. The MFS uses a set of virtual forces that satisfy a previously known boundary condition (or set of boundary conditions). In this particular case, the displacement field induced by an external ground vibration source at the ground surface region where the foundations of the building will be placed is the targeted boundary condition, which is evaluated in a set of collocation points. Considering an elastic half-space model of the soil, the MFS may employ its corresponding Green's functions to determine a set of virtual forces, which can be seen as a discretization of the desired virtual traction field that satisfy the boundary condition at the collocation points.

This methodology is designed considering that the boundary condition at the ground surface is obtained experimentally by a set of vibration sensors. Then, the resulting virtual forces are employed in a theoretical model that accounts for the building structure and the local subsoil to predict the vibration (and, eventually, the re-radiated noise) levels inside the new building. The term “hybrid”, when referring to this methodology, is thus employed in order to denote that it combines experimental measurements and a theoretical model. Figure 1 illustrates the three steps in which the proposed methodology is based, in where Ω represents the soil domain and $d\Omega$ the ground surface region where the building under study will be constructed. In the first step, the response of the ground surface to the incident wave induced by an external ground vibration source is evaluated at a set of sensors (collocation points) located at the domain $d\Omega$, resulting in

a discrete representation of the targeted boundary condition. The second step carries out the virtualization of the incident wave field employing a virtual traction distribution in an auxiliary surface S that encloses the building foundation systems to be constructed. This step is theoretically based on the indirect boundary integral equation for a single-layer potential in the frequency domain that defines the response of the domain enclosed by S as

$$U(\mathbf{r}) = \int_S H(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) T_v(\mathbf{r}_s) dS(\mathbf{r}_s), \quad (1)$$

where $U(\mathbf{r})$ represents the displacements of the soil at locations $\mathbf{r} = \{x \ y \ z\}^T$, restricted to the Ω_s domain, $T_v(\mathbf{r}_s)$ are the unknown virtual tractions along the auxiliary boundary and $H(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s)$ represents the Green's functions of the elastic half-space that provide the response at \mathbf{r} due to a point force applied along the S domain at \mathbf{r}_s , being $\mathbf{r}_s = \{x_s \ y_s \ z_s\}^T$ the location of the dS . The MFS proposes to approximate boundary integral equations such as equation (1) using a linear combination of fundamental solutions. Thus, considering a set of virtual point sources to represent the unknown traction field in the boundary, the application of the MFS results in the following system of equations

$$\mathbf{U}_c = \mathbf{H}_{cf} \mathbf{F}_v, \quad (2)$$

where \mathbf{U}_c and \mathbf{F}_v are column vectors that collect the response at the collocation points and the unknown complex amplitudes of the virtual forces, respectively, whilst \mathbf{H}_{cf} is the receptance matrix that relates the virtual forces and the collocation points response obtained with a half-space model of the local subsoil. In the present investigation, the number of collocation points is assumed to be smaller than the number of virtual sources, turning this system of equations to be under-determined. Pseudo-inverse can be used to solve this problem, whilst incorrect source amplitudes can arise when the selection of collocation points is not carefully chosen. Results presented in the next section clearly exemplifies this issue. Once the virtual forces amplitudes are determined, the response of the building-soil system can be obtained by

$$\mathbf{U}_b = \mathbf{H}_{bf} \mathbf{F}_v, \quad (3)$$

where \mathbf{U}_b represents the response at a set of evaluation points placed in the building-soil model and \mathbf{H}_{bf} is the receptance matrix that relates the virtual forces and the evaluation points response. The building-soil model is represented by the building domain Ω_b and the local subsoil domain Ω_s , which are intersected in the domain Ω_f , representing the foundations. The \mathbf{H}_{bf} matrix is obtained employing a building-soil model specially developed for the particular building to be studied. Suitable modelling

approaches to be used in this regard are 3D FEM-PML models [13], 3D FEM-BEM approaches [10, 14], semi-analytical modelling methods for 3D soil-building systems [15, 16] or other hybrid options [17], among others.

The so-called *three-step solution* is a classical SSI method in which the problem is solved in three steps: the evaluation of the free field response, the determination of the foundation equivalent stiffness and the computation of the dynamic response of the building subjected to the base motion evaluated in the kinematic interaction step (dynamic interaction) [18]. In the context of this SSI problem solving architecture, the present approach provides various important benefits. First, the kinematic interaction is directly evaluated at the ground surface instead of at the soil-structure interface, making the procedure meshless, simple and standard for any foundation type. Furthermore, the incident wave field is here characterised by a set of virtual forces enclosing the structure which are computed in the second step of the proposed approach. Classical approaches transform the wave field into loads acting on the soil-structure interface, while in this method the virtual forces are located in the soil surrounding the structure, at S . The separation between the virtual forces and the soil-structure interface allows for controlling the effect of the structure foundations to these forces. Moreover, the virtual surface S where the forces are applied can be simply a semi-sphere (proposed in the present paper) rather than a geometrically complex soil-structure interface. Finally, the inclusion of the local subsoil as a part of the model to evaluate the building response ensures an accurate representation of the foundation stiffness.

3. OPTIMAL DISCRETIZATION STRATEGIES

In this section, the discretization strategy to deploy the hybrid method previously introduced is numerically studied at different 3D scenarios. The authors has previously studied and proposed good discretization practises for the application of this method in 2D or two-and-a-half-dimensional contexts in [12] and the present paper stands as an attempt to study the validity of the proposed schemes in a 3D point of view, which is the proper environment for the application of the method in real engineering scenarios. However, it is important to mention that the definition of the both S and $d\Omega$ domains as well as the discretization schemes for the virtual sources and the collocation points along them, respectively, is a task of significantly higher complexity in a 3D perspective than in a 2D one.

In order to develop this study, the experimental measurements on the ground surface have been replaced by

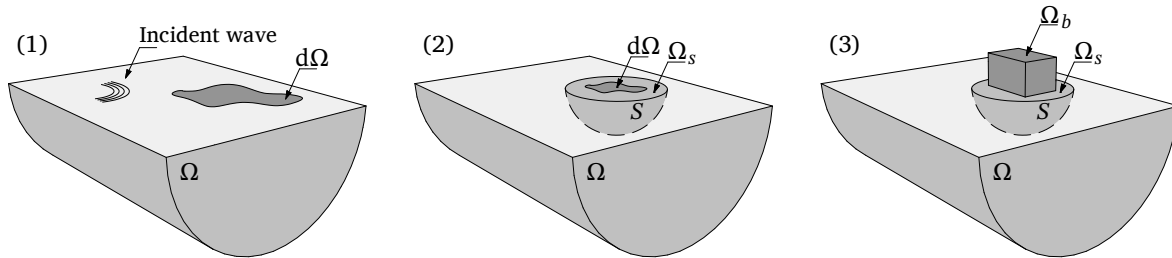


Figure 1: Schematic representation of the three steps of the proposed hybrid methodology: (1) Evaluation of the boundary condition at the ground surface where the building will be constructed, (2) virtualization of the incident wave field and (3) assessment of the building response.

synthetic data collected from the response due to a unitary harmonic vertical point load applied within the system of coordinates (x, y, z) at the point $(-4.5, 0, 0)$ m. The range of frequencies considered is up to 80 Hz. The response of the soil due to the external point load has been computed using the approach presented in [19]. The hybrid method is initially deployed considering no foundation system implemented, to study how well the method represents the free-field response of the soil depending on the distribution of virtual sources. The method is implemented considering just one collocation point at the origin of coordinates and the same point is used to evaluate its performance. For this case, the soil is assumed to be a homogeneous half-space with the following mechanical parameters: Young's modulus of 195 MPa, Poisson's ratio of 0.3, density of 2000 kg/m³ and damping of 0.04.

Thus, in this first stage, the aim is to assess the sensitivity of the method to different arrangements and distributions of virtual forces. In authors' previous study [12], virtual forces were uniformly distributed along a semicircle due to the 2D nature of the domain to be discretized. Since this distribution yielded good results in that context, it is proposed here to uniformly distribute virtual forces over a hemisphere. The distribution of N points equally spaced along the surface of a sphere is a classic problem in mathematics. In this work, two different discretization strategies that allow for a reasonably uniform distribution of the source points are studied: the first one involving Fibonacci spirals to distribute the sources and the other through an efficient distribution algorithm [20]. A illustrative view of the two distribution strategies is presented in Fig. 2.

The number of virtual forces has been determined so that their distribution over the hemisphere ensured that the distance between consecutive virtual forces is less than the wavelength of S-waves for the maximum calculation frequency, ensuring compliance with the previously established empirical rule defined in [12]. A radius of the virtual

force domain equal to two meters has been considered, resulting in a minimum of 10 virtual forces, less than what is shown in Fig. 2. In Figure 3, the vertical displacement observed at the evaluation point is presented for the reference model, where the response in the evaluation point due to the external harmonic vertical point load is directly obtained, and for the hybrid model in which both forms of distribution of virtual forces were used. The comparison of the results allows us to conclude that the optimized distribution leads to more accurate estimations of the response results obtained through the hybrid method that are closer to the numerical reference curve. Since the previous results considered a free-field situation, it is important to determine whether the conclusions can be corroborated for a situation in which there is an object in the domain that will disrupt the incident wave field.

To study the distribution of collocation points, the case of a single rigid shallow foundation embedded in the soil is adopted. The considered foundation system is embedded in the soil, which is considered to be a homogeneous half-space with the following mechanical parameters: shear wave speed of 150 m/s, Poisson's ratio of 0.49, density of 1900 kg/m³ and damping of 0.03. The shallow foundation geometry is squared from a top view, having the dimensions of 1 m side and 0.25 m depth. The centre of the shallow foundation is located at the origin of coordinates. The calculations are done considering the distribution of the virtual sources following the optimised methodology on a hemisphere of 2.6 m of radius. The amount of virtual sources considered for this case is determined in the basis of the same ideas presented before when studying the distribution of virtual sources. Two amounts are considered: 16 and 24. Regarding the amount of collocation points, three scenarios are adopted: one, four (squared distribution) and 16 (four squared distribution) collocation points distributed along the surface virtually occupied by the shallow foundation.

Results are shown in Fig. 4. It can be observed that

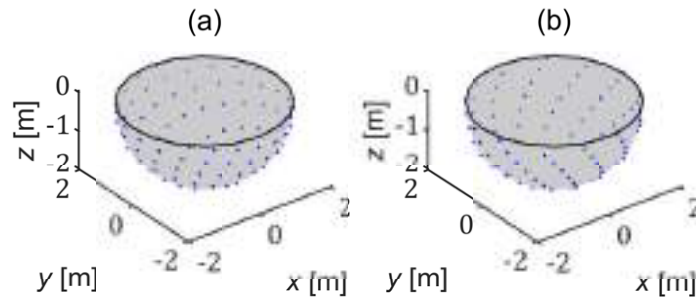


Figure 2: Schematic representation of the source distribution along the hemisphere for the Fibonacci spirals case a) and for the optimised methodology presented by Kogan b).

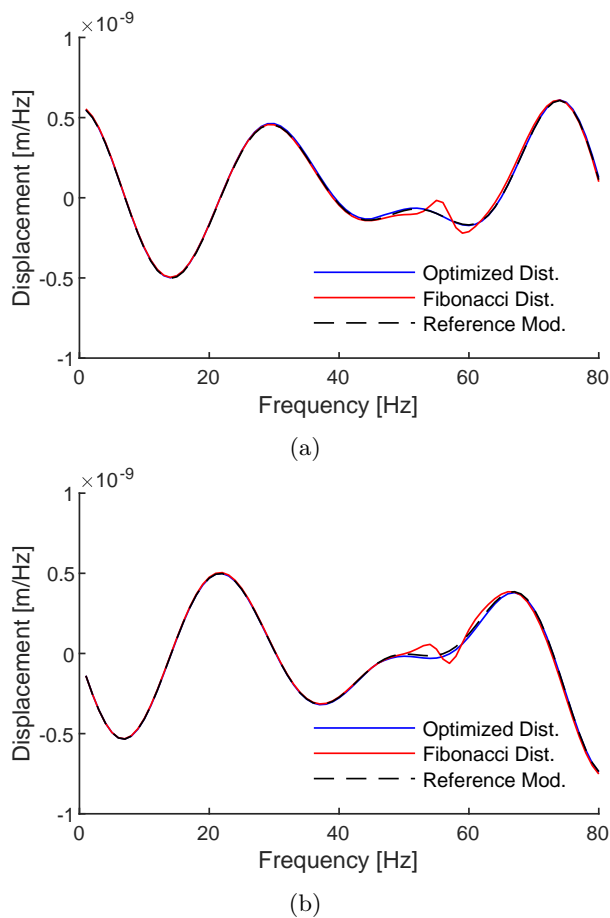


Figure 3: Real a) and imaginary b) components of the vertical displacement at the evaluation point for the reference solution and for the hybrid method applying the two different discretization strategies.

the hybrid method is not capable to reproduce accurately the response of the shallow foundations when just one collocation point per foundation is chosen. Results for this

case are significantly unstable because the system of equations appears to be strongly under-determined. However, it is found that considering just three extra collocation points per foundation highly enhances the accuracy of the method, showing a reasonable performance all along the frequency spectrum. Results obtained when 16 collocation points per foundation are adopted are found to be quite accurate, although it is important to note that a practical application of this arrangement of sensors/collocation points is largely unfeasible.

It is important to mention that these results are achieved accounting for the three components of the displacement at the collocation points and the three components of the virtual forces. Using, for example, only the vertical component for the collocation points, which could be a very promising alternative in order to reduce the amount of data acquisition work when carrying out the required ground surface measurements, leads to poor accuracy of the method. Furthermore, it is also found that the method works with multiple distributions of collocation points along ground surface enclosed by S , even they are not located at the specific regions where the foundations will be installed, as shown also in [12]. However, locating the collocation points at the virtual foundations provides a convenient trade-off between amount of collocation points and delivered accuracy.

4. CONCLUSIONS

This paper study the distretization strategies to bu used when employing the proposed hybrid methodology in a 3D context to ensure its proper operation. It is found that the tow studied distribution strategies for the virtual sources are delivering accurate results, while the optimised method reaches slightly better results. Regarding collocation points distribution, it is found that even employing significantly less collocation points than virtual sources the method is still capable to deliver accurate results in

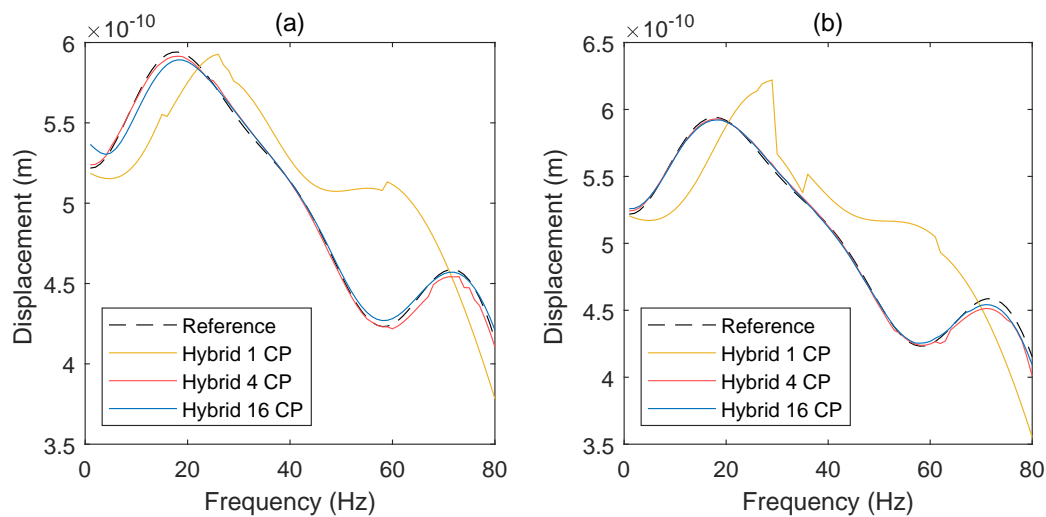


Figure 4: Vertical translational response of the foundation for the case of one foundation and considering 16 (a) and 24 (b) virtual forces. Results are shown for one, four and 16 collocation points (CP).

the frequency range of interest for ground-borne noise and vibration assessment studies. An interesting result of the present study is to show that accounting just for one tri-axial sensor per shallow foundation does not permit to reproduce correctly a particular incident wave field. Since using one tri-axial sensor per foundation is a common practice in technical assessments of noise and vibration in new buildings to be constructed near to, for example, operational railway lines, the results presented in this paper are suggesting that this usual practices should be revised. The present study also points out that the application of the proposed method for the assessment of ground vibration in new buildings to be constructed close to ground vibration sources appears to be feasible, since the results shown that the number of sensors required to reach an acceptable degree of accuracy is not prohibitive. However, when dealing with large buildings or facilities with multiple foundation systems, the proposed method may encounter practical complications due to the huge amount of vibration data that should be gathered. Non-synchronized measurements are a common solution to deal with large scale problems, but the proper operation of the proposed methodology in the presence of non-synchronized data has yet to be demonstrated. Thus, further research on the topic is advisable in order to advance towards a more practical and robust method.

REFERENCES

- [1] T. Balendra, K. H. Chua, K. W. Lo, S. L. Lee, Steady-state vibration of subway-soil-building system, *Journal of Engineering Mechanics* 115 (1) (1989) 145–162. [doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:1\(145\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:1(145)).
- [2] P. Fiala, G. Degrande, F. Augusztinovicz, Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic, *Journal of Sound and Vibration* 301 (3-5) (2007) 718–738. [doi:10.1016/j.jsv.2006.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.10.019).
- [3] P. Lopes, P. A. Costa, M. Ferraz, R. Calçada, A. S. Cardoso, Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 61-62 (2014) 269–285. [doi:10.1016/j.soildyn.2014.02.013](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.02.013).
- [4] P. Lopes, J. F. Ruiz, P. Alves Costa, L. Medina Rodríguez, A. S. Cardoso, Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model, *Science of the Total Environment* 568 (2016) 1333–1343. [doi:10.1016/j.scitotenv.2015.11.016](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.016).
- [5] K. A. Kuo, H. Verbraken, G. Degrande, G. Lombaert, Hybrid predictions of railway induced ground vibration using a combination of experimental measurements and numerical modelling, *Journal of Sound and Vibration* 373 (2016) 263–284. [doi:10.1016/j.jsv.2016.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.03.007).
- [6] L. Auersch, Building response due to ground vibration - Simple prediction model based on experience with detailed models and measurements, *Inter-*

- national Journal of Acoustics and Vibrations 15 (3) (2010) 101–112.
- [7] M. Sanayei, A. Kayiparambil P., J. A. Moore, C. R. Brett, Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building, *Engineering Structures* 77 (2014) 119–128. doi:10.1016/j.engstruct.2014.07.033.
- [8] D. López-Mendoza, A. Romero, D. P. Connolly, P. Galvín, Scoping assessment of building vibration induced by railway traffic, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 93 (2017) 147–161. doi:10.1016/j.soildyn.2016.12.008.
- [9] D. López-Mendoza, D. P. Connolly, A. Romero, G. Kouroussis, P. Galvín, A transfer function method to predict building vibration and its application to railway defects, *Construction and Building Materials* 232 (2020). doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117217.
- [10] K. A. Kuo, M. Papadopoulos, G. Lombaert, G. Degrande, The coupling loss of a building subject to railway induced vibrations: Numerical modelling and experimental measurements, *Journal of Sound and Vibration* 442 (2019) 459–481. doi:10.1016/j.jsv.2018.10.048.
- [11] A. Quagliata, M. Ahearn, E. Boeker, C. Roof, J. A. Volpe, *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*, Tech. Rep. 0123, Federal Transit Administration (2018).
- [12] R. Arcos, P. J. Soares, P. Alves Costa, L. Godinho, An experimental/numerical hybrid methodology for the prediction of railway-induced ground-borne vibration on buildings to be constructed close to existing railway infrastructures : Numerical validation and parametric study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 150 (2021) 106888. doi:10.1016/j.soildyn.2021.106888.
- [13] M. Papadopoulos, S. François, G. Degrande, G. Lombaert, The influence of uncertain local subsoil conditions on the response of buildings to ground vibration, *Journal of Sound and Vibration* 418 (2018) 200–220. doi:10.1016/j.jsv.2017.12.021.
- [14] P. Coulier, S. François, G. Lombaert, G. Degrande, Coupled finite element – hierarchical boundary element methods for dynamic soil – structure interaction in the frequency domain, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 97 (7) (2014) 505–530. doi:10.1002/nme.
- [15] H. E. M. Hunt, Prediction of vibration transmission from railways into buildings using models of infinite length, *Vehicle System Dynamics* 24 (S) (1995) 234–247.
- [16] A. Clot, R. Arcos, J. Romeu, Efficient three-dimensional building-soil model for the prediction of ground-borne vibrations in buildings, *Journal of Structural Engineering - ASCE* 143 (9) (2017) 1–13. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001826.
- [17] P. Lopes, P. Alves Costa, R. Caçada, A. Silva Cardoso, Influence of soil stiffness on building vibrations due to railway traffic in tunnels: Numerical study, *Computers and Geotechnics* 61 (2014) 277–291.
- [18] E. Kausel, Early history of soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30 (9) (2010) 822–832. doi:10.1016/j.soildyn.2009.11.001.
- [19] P. Bucinskas, L. V. Andersen, Semi-analytical approach to modelling the dynamic behaviour of soil excited by embedded foundations, *Procedia Engineering* 199 (2017) 2621–2626. doi:10.1016/j.proeng.2017.09.396.
- [20] J. Kogan, A new computationally efficient method for spacing n points on a sphere, *Rose-Hulman Undergraduate Mathematics Journal* 18 (2) (2017) 5.

INVERSIÓN DE MODELO, TEORÍA Y APLICACIÓN

Albert Isnardo Iglesias^{1*}

Pere Vicenç Rodríguez Sorribes¹

¹ICR, Ingeniería para el Control del Ruido S.L., C/Berruguete 52, 08035 Barcelona, España

RESUMEN

La Teoría del Problema Inverso es una teoría matemática que integra métodos para extraer toda la información posible de los datos medidos, con el fin de encontrar los valores más probables para un modelo físico desconocido a priori. Se basa en el cálculo de probabilidades y aporta una extensión natural de varios criterios de optimización.

En este artículo, la teoría se aplica para reconstruir el campo acústico en varios sectores, entre ellos el industrial, para obtener las potencias acústicas de un conjunto de fuentes sonoras que no pueden parar su actividad, tanto para ruido interior como para ruido exterior. También se ha aplicado para diseñar un tratamiento optimizado de una soplante e incluso para reconstruir el campo acústico de media-alta frecuencia en el habitáculo de un Ferrari 456. En todos estos casos, a partir de un conjunto de mediciones de ruido (L_{eq}), se obtuvieron las potencias acústicas de todas las fuentes que estaban funcionando en el momento de la medición.

La teoría no solo abarca el campo acústico, sino que también se usa para la obtención de las fuerzas en operación a partir de la medición del nivel de vibraciones en funcionamiento real y un modelo numérico.

ABSTRACT

The Inverse Problem Theory is a mathematical theory that integrates methods to extract as much information as possible from measured data, to find the most probable values for an a priori unknown physical model. It is based on the calculation of probabilities and provides a natural extension of various optimization criteria.

In this article, the theory is applied to reconstruct the acoustic field in several sectors, including industry, to obtain the acoustic powers of a set of sound sources that cannot stop their activity, both for indoor and outdoor noise. It has also been applied to design an optimized treatment of a blower and even to reconstruct the medium-high frequency acoustic field in the passenger compartment of a Ferrari 456. In all these cases, from a set of noise measurements (L_{eq}), the acoustic

powers of all sources operating at the time of measurement were obtained.

The theory not only covers the acoustic field but is also used to obtain the forces in operation from the measurement of the vibration level in real operation and a numerical model.

Palabras Clave— Inversión, Modelo, Ruido, Industria, Automoción

1. INTRODUCCIÓN

El método de inversión de modelos se basa en un cálculo de probabilidad para encontrar unos parámetros no conocidos y no accesibles, como pueden ser unas potencias acústicas, a partir de la combinación de un conjunto de informaciones conocidas y usando un operador lineal o no lineal que los relacione (modelo numérico).

Los siguientes pasos describen la aplicación del método:

- 1) Se divide la actividad o fuente bajo estudio en varias partes, identificándolas como posibles generadoras de ruido/vibración, pudiendo ubicar al menos un punto de control cercano y uno más alejado y realizar una medición de ruido/vibración en cada punto.
- 2) Con el funcionamiento real de la actividad, se mide en los diferentes puntos de control.
- 3) Combinando los resultados de las mediciones y la información disponible, se aplica la teoría brevemente descrita en el capítulo siguiente.
- 4) Se obtienen las contribuciones de cada parte definida en 1). Tras esto, se pueden evaluar las mejoras al ir eliminando cada una de las contribuciones en orden de mayor a menor (diagrama de espiral).
- 5) Se puede evaluar la estabilidad de los resultados y la desviación estándar (errores de reconstrucción).
- 6) Con los resultados, se aplica la matriz de covarianza o correlación (correlación = covarianza / desviación estándar) para detectar qué contribuciones son dependientes.

ICR ha aplicado este método en varios casos, tanto en ámbito industrial como en automoción. Se muestran en este

* **Autor de contacto:** aisnardo@icrsl.com

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

documento tres de ellos, considerados representativos. En estos casos de éxito, se han obtenido las potencias acústicas y las contribuciones individuales y acumuladas de las fuentes de ruido y se ha podido aplicar una mejora y reducir el nivel de ruido hasta el objetivo del proyecto.

2. BREVE INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE INVERSIÓN DE MODELOS

De un modo general, podemos decir que el método de la inversión de modelo es el proceso que se puede aplicar cuando los parámetros que definen un proceso físico, como puede ser una actividad en la que se genera ruido y/o vibraciones, no son directamente accesibles. Se obtendrán estos parámetros a partir de la medición de sus efectos, por ejemplo, el ruido/vibraciones que generan en su entorno las fuentes a evaluar.

Cabe anotar que el nivel de ruido/vibraciones obtenido en una medida no es el verdadero valor. La mejor forma de indicar este nivel medido es la probabilidad de que el verdadero valor del parámetro se encuentre entre un conjunto de valores aproximados [3].

La resolución de una inversión de modelo general puede plantearse como la resolución del problema de combinación de distintos tipos de información. En un caso general de aplicación en el campo de la acústica, esta información serían las mediciones del nivel de presión sonora, el programa informático de propagación del sonido y, si se dispone de ella, cualquier información *a priori* sobre los valores de las potencias acústicas. Mediante estos tres conjuntos de datos, es posible obtener las potencias acústicas reales de cada una de las fuentes identificadas.

La relación entre estos conjuntos de datos puede enunciarse como sigue [1]:

$$F(p(r_M, f)) = G(d, w(r_N, f)) \quad (1)$$

Donde:

$F(p(r_M, f))$ es un vector que contiene una función F de los valores de presión acústica, p, en M puntos de recepción a una frecuencia dada f.

$w(r_N, f)$ es un vector que contiene potencia acústica real de N fuentes ubicadas en el entorno a una frecuencia dada f.

G puede ser cualquier operador lineal o no lineal que relacione p (la presión acústica) y w (potencia acústica) que dependa de una cierta cantidad de parámetros d. En muchas aplicaciones en el ámbito de la acústica, G es un operador lineal energético que relaciona el valor cuadrático de la presión sonora en una gran cantidad de puntos de recepción con la potencia acústica de las fuentes. En el mercado actual, este modelo numérico, se encuentra en múltiples softwares comerciales [4] [5] [6].

d correspondería a el conjunto de parámetros que se pueda conocer del entorno del estudio: posición de las fuentes y de

los puntos de recepción, la frecuencia, la geometría del problema, los efectos de difracción, etc.

Resolver el "problema inverso" consiste en obtener w una vez que se tengan algunas mediciones sobre un subconjunto finito p o F(p), con sus inevitables errores, y conociendo G con un cierto grado de precisión.

Una vez que se dispone de las potencias acústicas de cada fuente, el siguiente paso es comprobar la validez de los resultados estudiando la estabilidad de la solución y buscando posibles errores.

Finalmente, la matriz de covarianza nos dará la información de cuales de las fuentes identificadas tienen relación entre ellas y no pueden tratarse de manera independiente.

3. MEDICIONES EN CAMPO



Figura 1. Mediciones de ruido en una industria

La campaña de mediciones puede ser más o menos compleja en función de las dimensiones de la actividad bajo estudio y el número de fuentes identificadas. Pero es importante tener en consideración dos aspectos.

El primero de ellos, es que para que el método funcione, el número de puntos de medición de control debe ser mayor que el número de fuentes de ruido identificadas, para tener un sistema de ecuaciones sobre determinado. Es recomendable que la ubicación de estos puntos se divida entre cercanos a la fuente y alejados a esta. Esto tiene un efecto que puede traducirse en una limitación: al tener un gran número de puntos de medición, hay que conseguir gestionar el funcionamiento de las fuentes para que puedan estar activas durante largos periodos de tiempo, recomendando que sea un ruido lo más estacionario posible.

El segundo tiene que ver con la elección de los puntos de medición, pues desempeña un papel crucial en la obtención de una buena solución del problema, sobre todo para identificación de las fuentes que se encuentran muy próximas entre ellas. En este caso, las dos fuentes pueden considerarse como una fuente puntual desde un punto distante, y se obtendrá el mismo nivel de presión acústica en ese punto

asignando el valor de potencia acústica global a la primera fuente y un valor nulo a la segunda, o viceversa. Cuando se aplique el método de inversión, sólo se obtendrá una de estas soluciones y será imposible saber cuál es la fuente realmente problemática, a menos que se tomen más puntos de medición entre ellas. Si esto no es posible, sólo a posteriori, realizando un análisis de la estabilidad de la solución, se podrá detectarlos y encontrar la manera de resolver la incertidumbre. Por este motivo, se recomienda hacer un análisis previo *in situ* antes de definir los puntos de medición.

4. CASOS DE ÉXITO EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL

4.1 Industria de gas-líquido

El primer caso de éxito presentado es el de una industria de Toulouse dedicada a la producción de gas líquido, en la que se identificaron 40 fuentes de ruido y se realizaron más de 70 puntos de medición. En la Figura 2 se muestra una comparación entre el campo medido y el reconstruido en forma de espectrograma. Se aprecia una gran similitud entre ellos, excepto en los puntos de recepción 68 y 69, donde las diferencias alcanzan los 10-15 dBA. Estas grandes diferencias en estos puntos se deben a deficiencias en la simulación. Los puntos estaban situados en la fábrica real debajo de una cabina, que no se tuvo en cuenta en la modelización. Esto nos da una idea de cómo es de importante es tener en cuenta todo el entorno a la hora de definir un modelo numérico que se aproxime al máximo a la realidad. Los puntos de recepción 68 y 69 se eliminaron del grupo de datos y el problema se resolvió sin ellos.

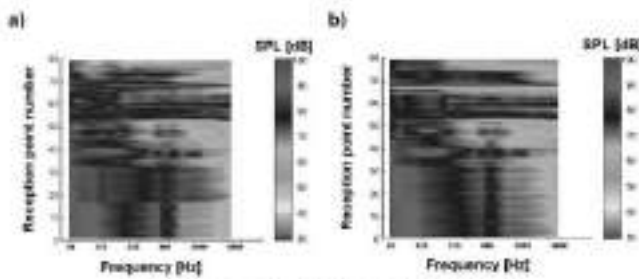


Fig. 2. (a) Measured SPL field; (b) reconstructed SPL field.

Figura 2. Comparativa entre SPL medido y reconstruido

Para probar la solución, se generaron miles de nuevos vectores SPL en torno a los medidos. Los valores generados seguían un patrón gaussiano de varianza 1 dB, lo que significa que el 95% de ellos se encuentran en un intervalo de 2 dB alrededor del SPL medido. A continuación, se resolvió el problema inverso con la restricción positiva para cada nuevo vector y se obtuvo un conjunto de miles de vectores de potencia acústica para cada frecuencia.

En la Figura 3 se obtiene un mapa de niveles de presión sonora en dBA de la zona cercana mediante el software de propagación del sonido y utilizando la potencia acústica calculada para cada fuente.

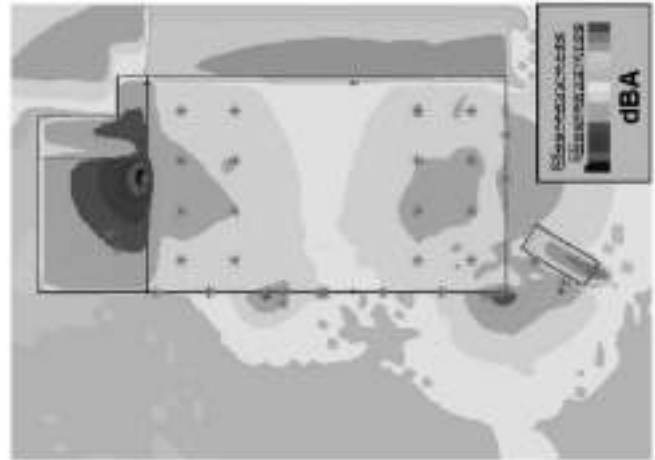


Figura 3. Mapa de niveles de la presión sonora mediante el software de propagación usando las potencias acústicas calculadas

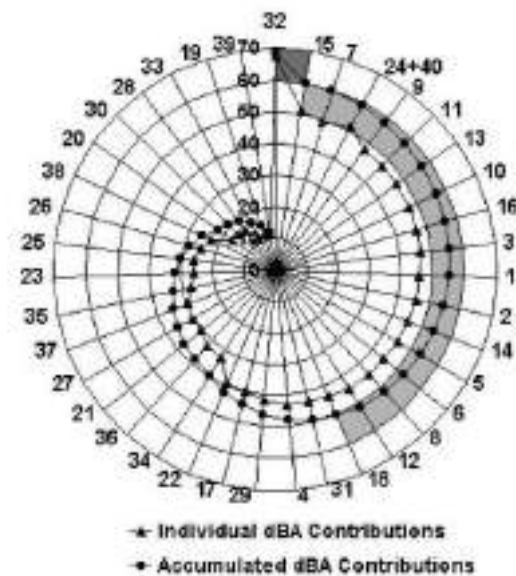


Figura 4. Gráfico radial de contribuciones individuales y acumuladas

Los resultados de las secciones anteriores se utilizaron para calcular las contribuciones al nivel de presión acústica global en la ubicación de un punto receptor en campo lejano. Un estudio independiente y previo había indicado un nivel de presión acústica global de 68 dBA en ese punto. Este valor coincide exactamente con nuestra predicción utilizando la potencia acústica obtenida para cada fuente de ruido.

En la Figura 4 un gráfico radial muestra las contribuciones individuales y acumuladas de las fuentes al nivel de presión sonora en el punto receptor de control. Observándolo se puede saber qué fuentes de ruido deben modificarse para reducir el ruido y la mejora que se obtendrá.

La fuente 32, un ventilador industrial, es la que más contribuye. Como se deduce de la Figura 4, si reducimos su contribución de 68 dBA a 50 dBA se obtendrá una reducción global de 68 dBA a 60 dBA en el punto receptor. Siguiendo las deducciones anteriores, la fuente 32 se silenció mediante un silenciador de baffles paralelos. Su nueva contribución calculada en el punto receptor fue de 52 dBA, lo que supone una reducción global del nivel de presión sonora de 68 a 61 dBA. Una medición de prueba a posteriori mostró una buena concordancia con la predicción dando un valor global en el receptor de 61,5 dBA.

4.2. Industria de piezas mecánicas

Otro ejemplo de caso de aplicación en el ámbito industrial se centra en una industria dedicada a la fabricación de piezas para la automoción ubicada en un entorno residencial, con varios puntos receptores afectados. Tras la evaluación de la industria, se identificaron 82 posibles fuentes de ruido y se realizaron 125 mediciones en diferentes puntos de control durante dos jornadas de 8 h, además de tener en cuenta 6 mediciones realizadas previamente por una ECA en 6 puntos receptores cercanos, que sirvieron para validar el modelo y obtener la reducción tras la aplicación de una mejora acústica en las fuentes con más nivel. Para ello, se realizó un modelo numérico reconstruyendo la situación acústica actual y la futura. Tras obtener las contribuciones de cada una de las fuentes en cada uno de los puntos de control, se estableció una prioridad en la aplicación de medidas correctoras.

Para evaluar la incidencia de las desviaciones entre los niveles de presión sonora medidos *in situ* y los niveles de presión sonora obtenidos aplicando el método de inversión de modelo, se representa el histograma de las diferencias entre ambos valores en dBA. Con el histograma de la Figura 6 podemos ver como más de la mitad de los puntos medidos se reconstruyen con una precisión situada en ± 1 dBA que es desde luego mejor que la precisión de medida e incluso mejor que la estabilidad del ruido.

Una vez obtenidas las potencias de las diferentes fuentes y constatada la validez del proceso, se realizó una reconstrucción del campo acústico en dBA alrededor de la planta industrial y se obtuvo los valores en los receptores sensibles, tal como muestra la Tabla 1. Las diferencias entre las mediciones y la reconstrucción mediante el modelo son inferiores a 3.5 dB.

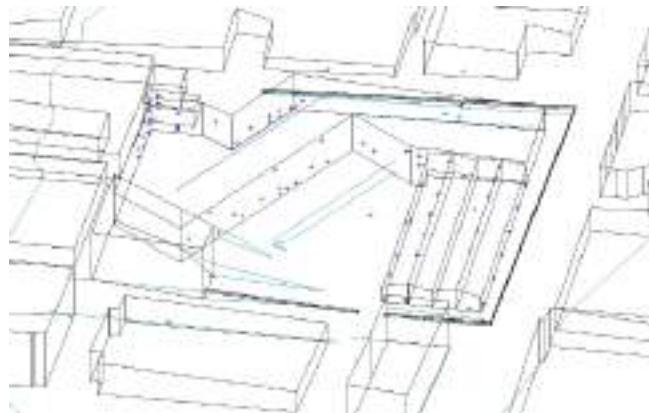


Figura 5. Vista isométrica del modelo con las fuentes de ruido identificadas

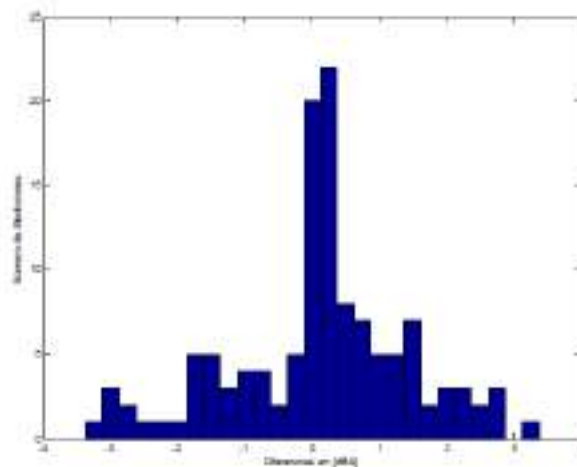


Figura 6. Histograma de diferencias entre presiones sonoras reconstruidas y presiones sonora medidas

Tabla 1. Comparativa de la reconstrucción del modelo y las mediciones realizadas previamente por una ECA.

Punto	Reconstrucción de la situación actual [dBA]	Medición nocturna ECA [dBA]	Diferencia [dB]
1	54.4	53	-1.4
2	53.3	53.6	0.3
3	52.2	52.4	0.2
4	54.9	54.6	-0.3
5	67.8	68.9	1.1
6	60.8	57.7	-3.1

5. CASOS DE ÉXITO EN AUTOMOCIÓN

5.1 Fabricante de vehículos (Ferrari 456)

También se ha aplicado el método en automoción en un vehículo ya construido, identificando como fuentes de ruido 44 superficies y realizando mediciones en 73 puntos en el interior de la cabina, con el objetivo de conocer los principales contribuidores en el ruido en el rango frecuencial entre 315 Hz y 5.000 Hz.

En este caso de aplicación, el modelo numérico utilizado se implementó a medida para el proyecto por personal de ICR mediante una herramienta de programación [6].

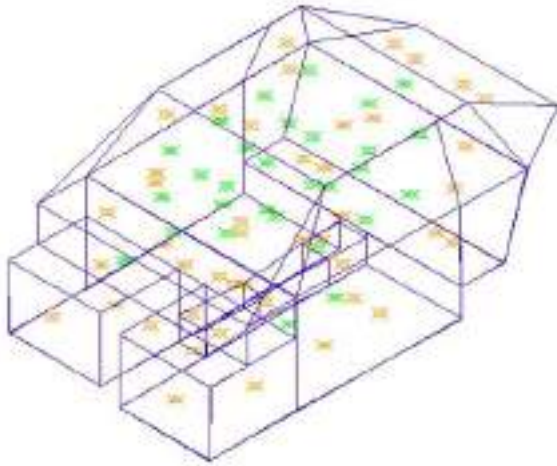


Figura 7. Ubicación de los puntos de medición dentro de la cabina

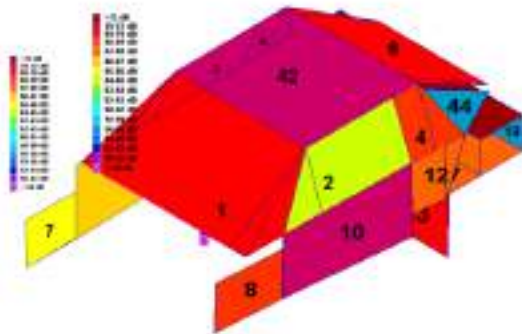


Figura 8. Potencias acústicas en el modelo numérico implementado para Ferrari

Tras obtener las potencias (Figura 8 y 10), se realizó el diagrama de contribuciones individuales y acumuladas (Figura 9) al nivel sonoro en el oído del conductor. Con esto, es posible ver cuáles son las superficies que más radian y la resultante mejora al reducir su contribución.

Para probar la solución se generó miles de nuevos vectores SPL alrededor de los valores de las mediciones,

siguiendo una distribución gaussiana de varianza 1 dB, y se resolvió el problema inverso para cada uno de ellos. Como dato a destacar, se obtuvieron diferencias de 15 dB para la superficie número 7, lo que significa que el nivel de presión sonora en puntos cercanos a esta superficie no está justificado por esta, como parecían indicar las mediciones.

También se calculó la matriz de covarianza *a posteriori* y la raíz cuadrada de sus elementos diagonales (desviaciones estándar), utilizado para obtener el margen de variación. Esto se muestra en la Figura 10 como barras de error alrededor del valor promedio obtenido de la potencia acústica de cada fuente. A partir de la matriz de covarianza se evaluó también la matriz de correlación. Esta no da correlaciones apreciables excepto para las superficies 6 y 40, indicando así que no se han resuelto de forma independiente. Para solucionar esto, se necesitarían más puntos de medida entre ellas.

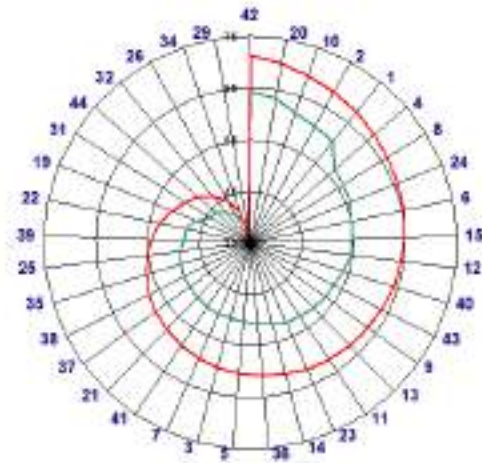


Figura 9. Gráfico radial de contribuciones individuales (verde) y acumuladas (rojo)

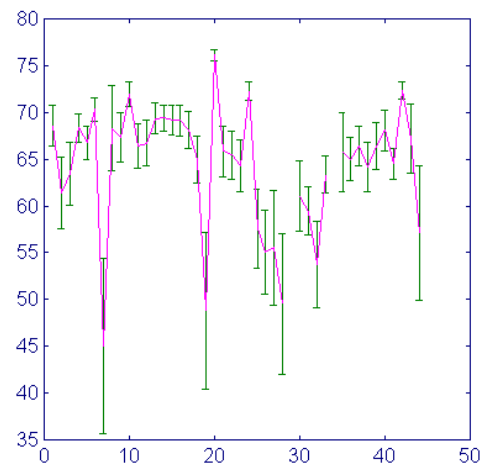


Figura 10. Potencias acústicas y margen de variación al aplicar las desviaciones estándar

6. CONCLUSIONES

Tras una breve explicación del método de inversión de modelos y los casos de éxito mostrados, se demuestra que es posible aplicar el método ante cualquier problema de ruido y vibraciones donde se cumpla lo siguiente: ha de ser posible realizar mediciones de manera controlada en varios puntos, reproducir la situación mediante un modelo numérico y conocer el máximo de parámetros que caracterizan su entorno. Con esto, el método nos permite caracterizar las fuentes de ruido/vibraciones y obtener las contribuciones de cada una de ellas, pudiendo distinguir qué fuentes hay que reducir y qué nivel resultante habrá tras unas mejoras aplicadas. Además, con las matrices de covarianza y las matrices de correlación obtenidas se puede comprobar si hay relación entre las fuentes y se resuelven de forma independiente.

La mayor ventaja de esta metodología es que puede aplicarse con la actividad bajo estudio en condiciones normales de funcionamiento y requiere menos mediciones que otras técnicas (por ejemplo, la intensimetría). No obstante, una desventaja es que el ruido tiene que ser principalmente estacionario o permanecer estacionario durante largos periodos de tiempo.

A modo de resumen, las ventajas que presenta el método respecto a otros métodos tradicionales son:

- 1) La modelización puede hacerse una vez terminado el diseño y/o en funcionamiento normal de la actividad.
- 2) El tiempo dedicado a las mediciones se reduce respecto a otros métodos.
- 3) Para cálculo y el análisis de los resultados se necesita menos de una semana.
- 4) Las mediciones se realizan sin cambiar ni afectar a la forma en que funciona la actividad bajo estudio (industria, automóvil, etc), ya que no es necesario modificar ninguna superficie.
- 5) El método permite conocer las fuentes identificadas de ruido/vibraciones a modificar y la mejora que se puede conseguir.

7. REFERENCIAS

[1] Guasch O., Magrans F.X.,Rodriguez P.V.; 2002. An inversion modellig method to obtain the acoustic power of the noise sources in a large factory. *Applied Acoustics* 63, 401-417.

[2] Guasch O, Magrans FX, Rodriguez PV, Manacorda G. An innovative approach for the noise reconstruction and analysis at the medium-high frequencies. In: *Proceedings of euro-noise*, Munich, Germany, October 1998. Vol I. p. 503–9.

[3] A.Tarantola, *Inverse Problem Theory*. (Elsevier Science B.V 1994)

[4] DataKustik GmbH, CadnaA-Software for Environmental Noise: <http://www.datakustik.com/>

[5] iSimpa, software for 3D sound propagation modelling <https://i-simpa.univ-gustave-eiffel.fr/>

[6] Matlab, The MathWorks, Inc. sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. <https://es.mathworks.com/>

CONTROL DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA EN ENTRONOS ALTAMENTE DEMANDANTES

Sergio Anda Pérez^{1*}

¹Technical & Sales Manager Viblens – Ingeniería del Silencio

RESUMEN

En entornos industriales severos, es frecuente que al diseñar aislamientos antivibratorios se tengan que tener en cuenta requisitos especiales a cumplir como la resistencia a grasas, aceites, altas temperaturas, etc. Se presenta un caso de estudio donde se diseñó y fabricó un amortiguador de malla metálica a medida capaz de trabajar en condiciones ambientales adversas, cumpliendo con criterios de resistencia a compresión y tracción con una altura muy limitada y que además debía cortar la transmisión térmica.

ABSTRACT

In harsh industrial environments, it is common to consider special requirements when designing anti-vibration isolations, such as resistance to grease, oils, high temperatures, and so forth. A case study is presented here where a custom-made metal mesh damper was designed and manufactured to operate in adverse environmental conditions, meeting compression and tension resistance criteria with a very limited height requirement, while also effectively blocking thermal transmission.

Palabras Clave— amortiguador, malla metálica, cojín metálico, vibraciones, tracción.

1. INTRODUCCIÓN

Realizar un aislamiento antivibratorio correcto es clave en entorno industrial y conlleva numerosas ventajas como la protección de los equipos, le mejora de la calidad del producto final, seguridad laboral y cumplimiento de normativa, ahorro energético, reducción de ruido, simplificación del mantenimiento y optimización del rendimiento, aumento del confort de operarios y trabajadores y por supuesto reducción de la transmisión de vibraciones. Sin embargo, solucionar problemas de transmisión de

vibraciones cuando las condiciones ambientales son severas (alta temperatura, vertido de aceites, grasa y productos químicos, etc.) y cuando se dispone de muy poco espacio para colocar un amortiguador resulta complicado utilizando tecnologías convencionales.

El presente documento detalla un caso de estudio basado en una situación real donde debido a los requerimientos específicos se diseñó y suministró con éxito una solución a medida basada en amortiguadores de malla metálica.

2. METODOLOGÍA

Se siguió la metodología habitual para tratar este tipo de proyectos:

1. Identificación del problema: Visita y elaboración de plan de actuación.
2. Evaluación de las necesidades: Diagnóstico mediante mediciones, simulaciones y cálculos.
3. Diseño y propuesta de solución: Diseño de la solución en base a los requerimientos. Al ser muy restrictivos, se diseñó un nuevo amortiguador validado mediante ensayos internos.
4. Ejecución de la solución: Una vez definida la solución se suministró y fue instalada por el cliente.
5. Evaluación de los objetivos: Se realizaron medidas post-operacionales para comprobar el cumplimiento de objetivos.

En todo momento se proporcionó soporte y acompañamiento durante todas las fases del proyecto y posteriormente.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1. Antecedentes

El cliente contactó con Viblens indicando un problema de transmisión de vibraciones de un motor a las máquinas adyacentes y al suelo. Esta vibración afectaba a la precisión de la línea de control final de una máquina cercana

* **Autor de contacto:** sergioandaperez@coitt.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

provocando el rechazo de piezas válidas. Se trataba de un motor de combustión industrial de 242 kilovatios mecánicos (kWm) de potencia máxima, 6 cilindros, dimensiones 1700 x 950 x 1250 mm (largo x ancho x alto), 986 kg y 6 apoyos. El motor estaba anclado rígidamente a una bancada metálica de acero al carbono pintado, a su vez unida rígidamente al suelo. La máquina estaba con los mantenimientos al día y se ubicaba en un entorno con condiciones ambientales severas debido a vertidos puntuales de aceite, grasas y productos químicos y a proximidad de las tuberías de escape (sin calorifugar por problemas de espacio) con temperaturas medidas en las zonas de apoyo de hasta 420 °C.

La actuación debía realizarse entre el motor y la bancada en lugar de entre la bancada y el suelo. La altura libre disponible para colocar los amortiguadores era únicamente de 2 cm (20 mm). Se indicó que la velocidad nominal de trabajo del motor según la ficha técnica era de 2200 rpm. Por el tipo de trabajo del motor, se esperaban sobrecargas puntuales a compresión y cargas extraordinarias a tracción.

Las tuberías de escape y conexiones del motor contaban con compensadores, manguitos y/o conexiones flexibles.

3.2. Ecuaciones utilizadas

Conversión de la velocidad del motor [rpm] a frecuencia f [Hz]:

$$f = \text{rpm}/60 \quad (1)$$

Frecuencia propia [Hz]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/m} \quad (2)$$

- K: Constante de rigidez del amortiguador [N/m]
- m: Masa [Kg]

Rigidez estática [N/m]:

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (3)$$

- F: Fuerza [N]
- δ : Deflexión [m]

Rigidez de resorte (aproximación) [N/m]:

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (4)$$

Razón de excitación (β):

$$\beta = f/f_0 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (6)$$

- ζ : Coeficiente de amortiguamiento

Atenuación antivibratoria (A) [%]:

$$A [\%] = 100 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 - 1} \right) \quad (7)$$

Atenuación antivibratoria (A) [dB]:

$$A [dB] = 20 \text{ LOG} \left(\frac{1-100}{100-A[\%]} \right) \quad (8)$$

3.3. Datos de trabajo

A continuación, se muestra un esquema en planta de los apoyos del motor y del centro de gravedad:

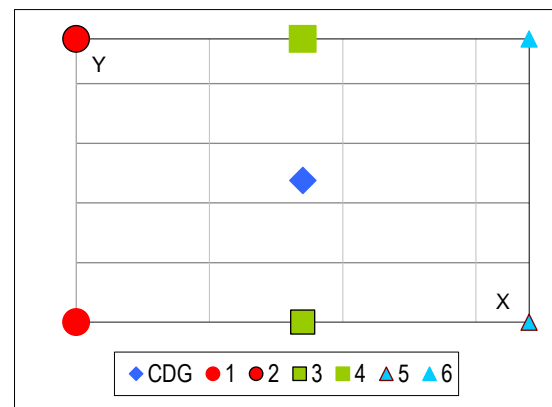


Figura 1. Esquema en planta del motor

Se consideró el CDG centrado. Distribución de apoyos y cargas:

Nº Amort.	Posición de los Amortiguadores		Cargas Reales (daN)
	X [mm]	Y [mm]	
1	0	0	161.2
2	0	950	161.2
3	850	0	161.2
4	850	950	161.2
5	1700	0	161.2
6	1700	950	161.2

Se consideraron los siguientes datos de entrada:

- Temperatura máxima de trabajo en apoyos: 420 °C
- Resistencia a las condiciones ambientales descritas
- F1: Frecuencia de rotación principal del motor 36.67 Hz (Ec. 1)
- F2: Frecuencia de encendido/ misfire: 18.33 Hz

- Altura máxima disponible: 20 mm
- Peso por apoyo: 161.2 daN
- Sobrecarga máxima resultante a compresión: 3g
- Sobrecarga máxima resultante a tracción: 0.5g

Se fijó el objetivo de cortar la transmisión vibratoria al máximo para evitar que afectara a la precisión de la línea de control final de la máquina cercana. El amortiguador utilizado debía además adaptarse a los requisitos ambientales y al espacio disponible.

3.4. Diagnóstico pre-operacional

Se realizó una medición de vibraciones con el motor al 100% de carga (operativa habitual) para corroborar que el pico máximo se ubicaba en la frecuencia de rotación principal del motor F1.

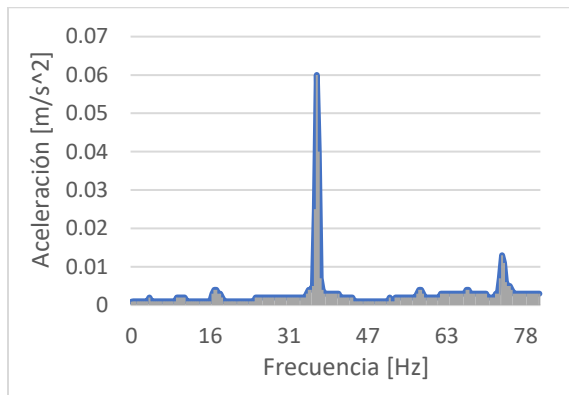


Figura 2. FFT vibraciones pre-operacional

Se comprobó que el pico principal se encontraba en F1 (36.67 Hz). La frecuencia de encendido/ misfire F2 (18.33 Hz) se consideró despreciable.

3.5 Diseño de la suspensión

Al tratarse de unos requisitos tan restrictivos, se diseñó un amortiguador a medida. Se fijaron los siguientes objetivos de diseño:

- Aislamiento vibratorio:
 - Teniendo en cuenta que se considera que existe aislamiento antivibratorio si $\beta \geq \sqrt{2}$ [1], se fijó un objetivo de atenuación antivibratoria (Ec. 7) de:
 - o $A [\%] \geq 75\%$
 - o Por lo tanto, $f_0 \leq 16.40$ Hz (4)
- Carga estática: ≈ 161.2 daN
- Resistencia mecánica:

Se fijaron los siguientes objetivos de resistencia frente a sobrecarga:

- o Compresión: 483.6 daN
- o Tracción: 80.6 daN
- Condiciones ambientales
 - o Temperatura de trabajo: 420 °C

- o Resistencia a aceites, grasas y productos químicos
- Dimensiones
 - o Altura máxima: 20 mm
 - o Diámetro máximo: Sin especificar

Teniendo en cuenta los requisitos, se decidió utilizar un amortiguador a medida de malla metálica de acero inoxidable del fabricante KnitMesh Technologies por contar con las siguientes ventajas:

- Diseño completamente a medida
- Frecuencias naturales entre 10 y 30 Hz
- Ratio de amortiguamiento entre 15% y 20%
- Resistencia a ambientes agresivos
- Válido para aplicaciones hasta 900°C

Para reducir al mínimo el espacio, se decidió utilizar un montaje macho-hembra con arandela esclava como el que se muestra en la siguiente figura:



Figura 3. Ejemplo de sistema arandela esclava de KnitMesh.

Este sistema, que se suele utilizar para aplicaciones de escudo térmico y de control de vibraciones, puede llevar piezas metálicas soldadas a los amortiguadores de malla metálica. Para unir ambas piezas y dotarlas de resistencia a tracción existe la opción de colocar un sistema de cierre mecánico. A continuación, se muestran distintos esquemas de montaje posibles:

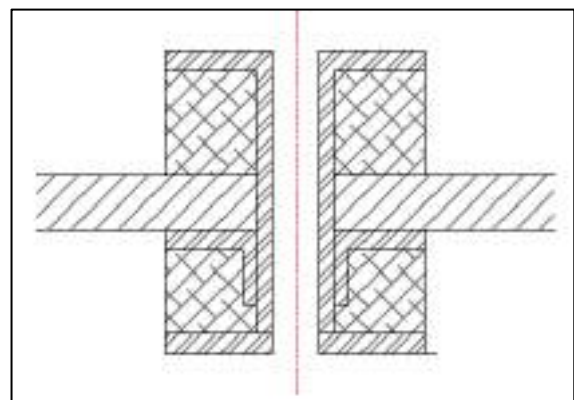


Figura 4. Esquema de montaje tipo 1.

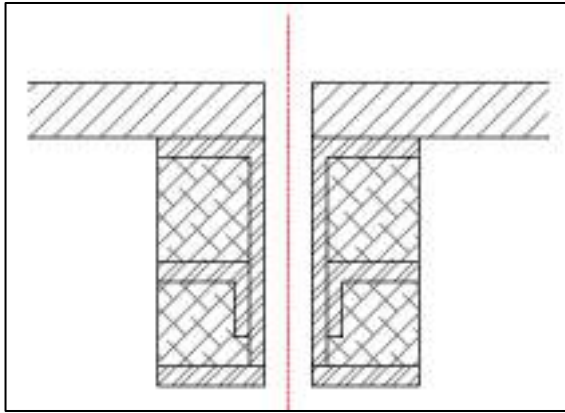


Figura 5. Esquema de montaje tipo 2.

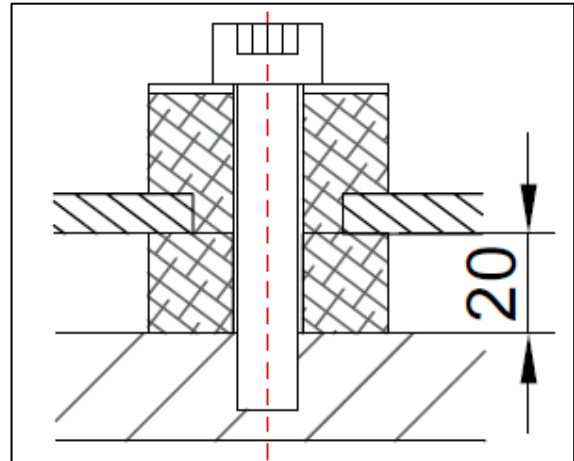


Figura 8. Esquema de montaje utilizado.

El amortiguador diseñado, se ensayó a compresión para comprobar que los valores de diseño de carga nominal y de resistencia mecánica se cumplían resultando la siguiente gráfica:

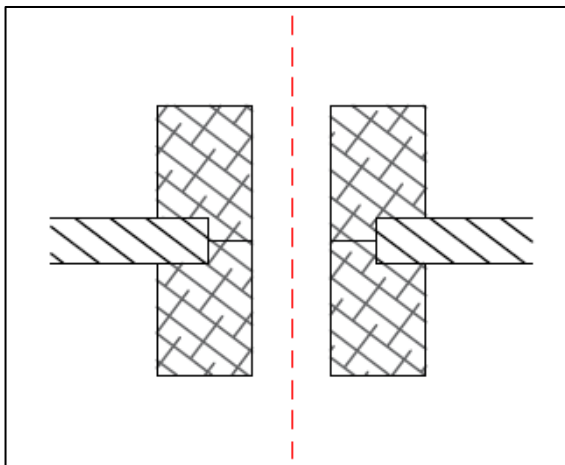


Figura 6. Esquema de montaje tipo 3

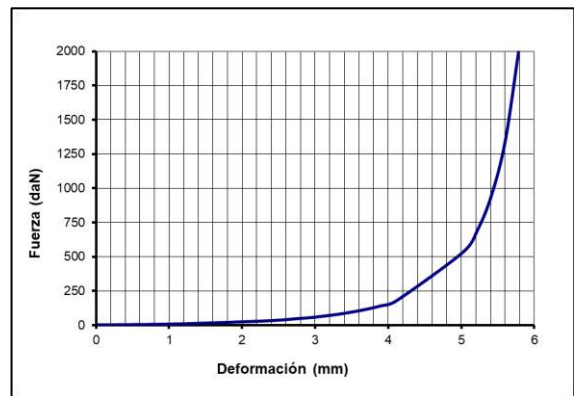


Figura 9. Ensayo a compresión, fuerza [daN] vs desplazamiento [mm]

Se calculó la frecuencia propia de trabajo del amortiguador [2] (Ec. 4) (Ec. 2) en función de la carga con el siguiente resultado:

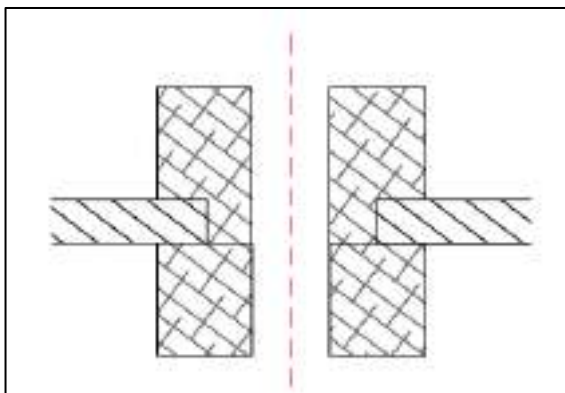


Figura 7. Esquema de montaje tipo 4.

Se seleccionó un esquema de montaje tipo 4 ya que había altura libre disponible encima de la posición del tornillo resultando el siguiente montaje:

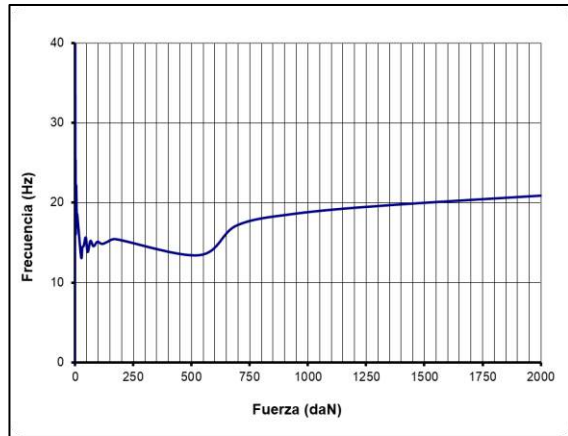


Figura 10. Curva calculada, fuerza [daN] vs frecuencia propia [Hz]

Se cumplieron o superaron los objetivos de diseño:

- Carga estática: 100-600 daN
- Frecuencia propia para 161.2 daN: 14.80 Hz
- Sobrecarga máxima: 2000 daN

3.6 Resultados esperados

Teniendo en cuenta los datos de entrada y los datos de diseño de la suspensión, se esperó conseguir los siguientes resultados:

- Aislamiento antivibratorio sin tener en cuenta amortiguamiento:
 - o A [%] = 80.54 % (Ec. 7)
 - o A [dB] = 14.20 dB (Ec. 8)
- Aislamiento antivibratorio teniendo en cuenta un amortiguamiento del 15% [3]:
 - o A [%] = 76.00 % (Ec. 6) (Ec. 7)
 - o A [dB] = 12.40 dB (Ec. 6) (Ec. 8)

Fuente de vibración	Frec. [Hz]	Aislamiento [%]	Aislamiento [dB]
F1 / Orden 1	37	76.00	12.40
Orden 2	73	92.41	22.40
Orden de frec. de encendido ±0.5	92	94.36	25.00
	110	95.50	26.90
	128	96.25	28.50

- Transmisibilidad teniendo en cuenta un amortiguamiento del 15% [2]:

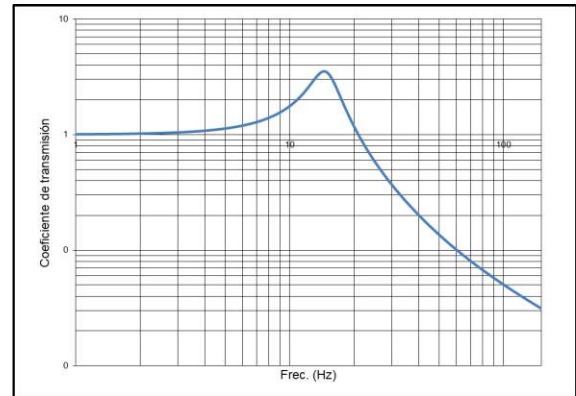


Figura 11. Curva de transmisibilidad

3.7 Ejecución y comprobación post-operacional

Los amortiguadores se suministraron y colocaron según el esquema propuesto. Como resultado:

- Se produjo una disminución de la percepción de la transmisión de vibraciones.
- La línea de control final de la máquina cercana dejó de registrar rechazos en piezas válidas.
- Se consideraron cumplidos los objetivos.

Debido a la planificación de cliente, no fue posible realizar mediciones de comprobación post-operacionales.

4. CONCLUSIONES

El amortiguador diseñado cumplió con los objetivos del proyecto reduciendo de forma significativa la transmisión de vibraciones.

Es recomendable tener en cuenta el aislamiento frente a vibraciones en la fase de proyecto porque esto permite anticipar y prevenir problemas potenciales que afecten al:

- Rendimiento
- Seguridad
- Vida útil

Tanto de las estructuras y máquinas a tratar y como a las de alrededor de su ubicación.

Los amortiguadores de malla metálica son una opción adecuada para aislar vibraciones en entornos con condiciones ambientales severas.

5. REFERENCIAS

- [1] Cyril M. Harris, “Manual de medidas acústicas y control del ruido”, McGraw-Hill, Aravaca, 1995.
- [2] Balakumar Balachandran, Edward B. Magrab, “Vibraciones”, Cengage Learning, México D.F., 2008.
- [3] A. P. French, “Vibraciones y ondas”, Reverté, Barcelona, 2001.

UN ESTUDIO PILOTO ACERCA DEL IMPACTO DE LAS EMOCIONES HUMANAS SOBRE LA PROLIFERACIÓN CELULAR Y LA EXPRESIÓN PROTEICA A TRAVÉS DE ONDAS ACÚSTICAS

David del Rosario-Gilabert^{1,2,3}

Gema Esquivá^{2}*

Violeta Gomez-Vicente²

Daniel Ruiz³

Pedro Poveda¹

Jesús Carbajo¹

Jaime Ramis¹

¹ Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal (Universidad de Alicante)

² Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía (Universidad de Alicante)

³ Departamento de Informática (Universidad de Alicante)

RESUMEN

La comunicación emocional es un fenómeno multimodal que afecta a la postura, los gestos, las expresiones faciales y la voz humana. En este contexto, los estados afectivos modulan sistemáticamente las señales acústicas emitidas en la producción del habla mediante los músculos laríngeos vía sistema nervioso central, transformando la señal acústica en un medio de transmisión afectivo. Diversos trabajos han analizado los parámetros acústico-emocionales de la voz humana, concluyendo que la calidad de voz, la frecuencia fundamental o el tono juegan un papel primordial en la expresión emocional. Paralelamente, un creciente número de estudios acumulan evidencia de la capacidad de las ondas mecánicas para afectar a la proliferación celular, poniendo de relieve el papel de las ondas mecánicas como agente biofísico. La presente investigación se centra en analizar los efectos de señales acústico-emocionales sobre la proliferación celular de la línea 661W y la expresión proteica. Para tal fin, se ha diseñado y calibrado un sistema de radiación electroacústico en el interior de una incubadora de CO₂ y establecido un método de captación de la señal acústico-emocional. Resultados preliminares apuntan a la capacidad de señales acústico-emocionales para influir sobre la proliferación celular.

ABSTRACT

Emotional communication is a multimodal phenomenon involving posture, gestures, facial expressions and the human voice. In this context, affective states systematically modulate the acoustic signals emitted in speech production through the laryngeal muscles via the central nervous system, transforming the acoustic signal into a means of affective transmission. Several studies have analyzed the acoustic-emotional parameters of the human voice, concluding that voice quality, fundamental frequency or pitch play a major role in emotional expression. In parallel, a growing number of studies accumulate evidence of the ability of mechanical waves to affect cell proliferation, highlighting the role of mechanical waves as a biophysical agent. The present investigation focuses on analyzing the effects of acoustic-emotional signals on 661W cell proliferation and protein expression. For this purpose, an electroacoustic radiation system has been designed and calibrated inside a CO₂ incubator and a method of acoustic-emotional signal capture has been established. Preliminary results point to the ability of acoustic-emotional signals to influence cell proliferation.

Palabras Clave — voz humana, emociones, agradecimiento, proliferación celular, expresión proteica.

* *Autor de contacto:* gema.esquivá@ua.es

Copyright: ©2023 del Rosario-Gilabert, D. et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el principio de los tiempos, las emociones han atraído la atención de la comunidad científica debido a su impacto sobre el día a día de los seres humanos y su bienestar [1]. Después de todo, las emociones forman parte inherente de la experiencia humana y juegan un papel fundamental en la comunicación con los demás [2], afectando a la postura, los gestos, las expresiones faciales y sonoras [3]–[8]. Sin embargo, comparado con las expresiones faciales, la expresión sonora de la emoción ha permanecido en segundo plano, a pesar de que diversos estudios atribuyen a la voz un papel destacado en el reconocimiento de la experiencia emocional [9], [10].

La expresión sonora de las emociones es un fenómeno complejo. Las personas alzan la voz cuando están felices o enfadadas, modificando mediante los músculos laríngeos las características de la voz [11], [12] y codificando información emocional en la señal acústica resultante [13]–[15]. A fin de cuentas, las emociones modifican las características del aparato fonador [13]–[15] influyendo sobre diferentes parámetros acústicos como la frecuencia fundamental, la intensidad o el tono [16]–[19].

El impacto de nuestro estado emocional o de salud sobre la voz humana es tal, que las personas son capaces de percibir y diferenciar emociones ajenas atendiendo únicamente a las señales de voz [20]–[24]. En este sentido, se han desarrollado sistemas de diagnóstico basados en biomarcadores acústicos capaces de detectar patologías como la depresión, la enfermedad de Parkinson, la esclerosis lateral amiotrófica u otras enfermedades neurológicas [25]–[31].

Paralelamente, diversos estudios en el ámbito de la biología han constatado la capacidad de las ondas mecánicas para inducir cambios en el comportamiento celular [32]–[39]. En concreto, la energía mecánica podría influir sobre la proliferación [40], la migración [40]–[42], diferenciación [43] o expresión génica [44] de diferentes líneas celulares. Entre los estímulos acústicos más estudiados en la literatura se encuentra el ruido, la música clásica o tonos puros [45]. Sin embargo, hasta la fecha, no se tiene constancia de trabajos que estudien los efectos de señales acústico-emocionales sobre el comportamiento celular. El objetivo del presente trabajo es determinar si las señales acústico-emocionales tienen la capacidad de influir sobre la proliferación de la línea celular 661W.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Inducción y captación de la señal acústico-emocional

El agradecimiento, entendido como la capacidad de un sujeto para sentir gratitud al reconocer y valorar lo que otra persona ha hecho por ella [46], [47], fue la emoción elegida para la experimentación. Entre los motivos principales se hallan, por un lado, la existencia de protocolos fiables para inducir un

estado de agradecimiento en el laboratorio basados en escritura [48], [49], y, por otro, la posibilidad de cuantificar emoción inducida mediante un análisis de texto afectivo.

El participante escribió un texto de agradecimiento basado en el trabajo de Toepfer and Walker [49] y leyó el texto a una distancia de 15 centímetros de un micrófono de condensador (Rode NT5 S) acoplado a un dispositivo acústico (Kaotica Eyeball) para ruidos y efectos de sala. El transductor se conectó a una grabadora Zoom-H6 y fue registrado en formato WAV (16 bits, 44.100 Hz). Redacción y locución se realizaron en un ambiente tranquilo y privado.

2.2. Sistema de radiación electroacústico

Las señales acústicas fueron radiadas sobre las placas de cultivo mediante un altavoz Bose SoundLink Color II suspendido en una percha acústica en una incubadora de CO₂, a un nivel de presión sonora (L_p) equivalente de 80 dB (calibrado realizado con sonómetro NA-28, número de serie 00762289, Rion Co. Ltd., Tokio, Japón) durante 72 horas. El transductor se conectó a un reproductor WAV (AGPTEK 32GB) con un cable mini Jack de 3.5 mm debidamente apantallado y a un HUB que le suministra energía.

Con objeto de minimizar el ruido de fondo de la incubadora, proveniente de sistemas electromecánicos y actuadores que mantienen las condiciones celulares óptimas [50], se realizó un tratamiento vibroacústico basado en elementos pasivos. Sobre sus paredes se dispuso material fonoabsorbente EliAcoustic Piramidal (595,0 x 595,0 mm con un espesor de 50 mm y una densidad de 29 kg/m³). En la bandeja de la incubadora se instaló aislante COPOPREN (470 x 490 mm de 80 mm de espesor y 80 kg/m³ de densidad).

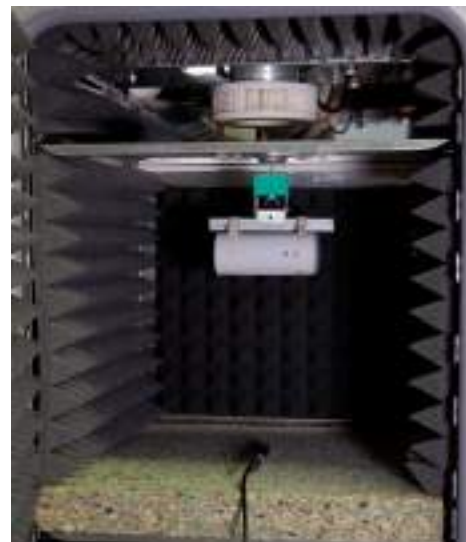


Figura 1. Set-up empleado. Sobre una incubadora convencional se dispone un tratamiento acústico compuesto por paneles fonoabsorbentes y un panel aislante para la reducción de vibraciones en las placas de cultivo celular.

2.3. Medidas de nivel de ruido

El setup general empleado en las medidas experimentales está compuesto de los siguientes elementos: Software ARTA (versión 1.9.1), tarjeta de adquisición TASCAM 144 mk2 y altavoz Bose SoundLink Color II suspendido en una percha acústica. En el caso de las medidas L_p se empleó un transductor micrófono Brüel&Kjaer (4188-A-21) así como un acondicionador de señal CCLD Brüel&Kjaer de 2 canales (1704-A-002). Se realizaron 9 medias sobre la bandeja de la incubadora (matriz de 3x3) en funcionamiento sin y con la solución de control de ruido propuesta.

2.4. Diseño experimental

En cuando a la metodología experimental, se seleccionaron 4 condiciones: (i) control (ii) voz emocional (iii) voz no emocional (iv) voz emocional sintetizada. En la condición "control", el sistema electroacústico permaneció apagado y las células se incubaron durante 72 horas. La condición "voz emocional" corresponde a la versión acústica del estímulo emocional descrito en la sección 2.1. La condición "voz no emocional" consistió en el registro de un fragmento de texto de "Don Quijote de la Mancha", en condiciones idénticas al caso (ii) y por el mismo sujeto. El estímulo "voz emocional sintetizada" se generó a partir de VoiceOver, una tecnología de lectura basada en síntesis de voz integrada en el sistema operativo Mac OS X. La señal de acústica se sintetizó a partir del texto de agradecimiento redactado por el participante (sección 2.1), y contuvo las mismas palabras, cadencia y amplitud sonora que la condición (ii). En última instancia, la señal de voz emocional sintetizada (iv) se ajustó atendiendo al registro de onda del secuenciador (Steinberg Cubase SX) para asegurar la máxima sincronía y equilibrar amplitudes.

Todos los estímulos fueron normalizados (-3 dB), limitados digitalmente (-1 dB) y radiados sobre las células durante 72 horas a un L_p equivalente de 80 dB (1 min). Además, se calculó y analizó tanto el espectro en frecuencia como el espectrograma de cada estímulo (Matlab R2020a).

2.5. Ensayos biológicos

Para los ensayos biológicos se empleó la línea celular 661W (Dr. Muayyad Al-Ubaidi, Universidad de Oklahoma). Se trata de una línea celular no auditiva derivada de retina de ratón transgénico que expresa marcadores de fotorreceptores y células ganglionares de la retina [51], [52].

2.5.1 Ensayo de proliferación celular

Las células se cultivaron en medio de Eagle modificado por Dulbecco (DMEM, 4,5 g/l de glucosa) suplementado con L-glutamina 2 mM, penicilina-estreptomicina y suero bovino fetal inactivado al 10 % (v/v) (Capricorn Scientific GmbH, Ebsdorfergrund, Alemania). Se sembraron de forma rutinaria

a una densidad de 100.000 células/flask y se incubaron a 37°C y 5% de CO₂. Para los ensayos de proliferación, se sembró a una densidad de 3k células/pocillo (6 réplicas) y se incubó durante 24 h. A continuación, las placas se transfirieron a la incubadora de prueba (Forma™ Steri-Cycle™ CO₂ incubator model 371, Thermo Electron Corporation, Waltham, MA, EE. UU.) y se mantuvieron 72 h para cada una de las condiciones descritas.

La proliferación celular se evaluó siguiendo el protocolo de Mickuviene et al., 2004 [53]. Tras exponer las células a las condiciones experimentales (subsección 2.4), se fijaron con etanol al 96 % (v/v) durante 10 min, seguido de tinción con cristal violeta al 0,05 % (p/v) disuelta en etanol al 20 % (v/v) durante 30 min. Se realizaron 3 lavados sucesivos con agua destilada para eliminar el exceso de colorante y las placas se secaron a temperatura ambiente protegidas de la luz. Se añadieron a cada pocillo 100 µL de etanol al 50% (v/v) y solución de ácido acético al 0,1% (v/v) para disolver el colorante, y la placa se incubó durante 5 min (temperatura ambiente). Finalmente, el sobrenadante se transfirió a una placa limpia de 96 pocillos y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (AD 340 Microplate Reader, Beckman Coulter, Brea, CA, EE. UU.) a 620 nm. La absorbancia obtenida se correlacionó con la densidad celular.

2.5.2 Ensayo de inmunocitoquímica

Las células de la línea 661W se sembraron en placas de poliestireno estériles de 24 pocillos (#3524, Costar, Corning Optical Communications, Madrid, España) a diferentes densidades (10k, 15k y 20k células/pocillo). Por cada densidad se realizaron 8 réplicas. A continuación, se incubaron con el sistema electroacústico apagado (grupo "control") y en presencia de los diferentes estímulos bajo estudio a 80 dB durante 72 h.

Tras el experimento, las células se fijaron con paraformaldehído al 4% (p/v) (#P6148 Sigma-Aldrich, Merck, Darmstadt, Alemania) en PBS durante 10 min. A continuación, se realizaron 3 lavados de 5 min cada uno con PBS y se permeabilizó con Tritón X-100 al 0,1% (v/v) (#T8787 Sigma-Aldrich) en PBS durante 10 min, seguido de otros 3 lavados de 5 min. Después, se bloqueó con albúmina sérica bovina (BSA; #A2153, Sigma-Aldrich) al 1% (p/v) en PBS durante 1 h. A continuación, se incubó con el anticuerpo primario que reconoce la proteína Ki67 (1:100, #28074-1-AP, Proteintech, un conocido biomarcador relacionado con la proliferación celular [54]). La incubación tuvo lugar durante toda la noche a 4°C en una cámara humidificada.

2.6. Estadística

Se utilizó el análisis estadístico para evaluar tanto los resultados de proliferación como de expresión proteica. En ambos casos, se realizó la prueba de Grubbs (detección de valores atípicos) y se calcularon estadísticos básicos. La normalidad de la muestra se verificó mediante Kolmogorov-

Smirnov. Las varianzas (absorbancia en el caso de la proliferación celular y brillo/píxel en inmunocitoquímica) se compararon mediante la prueba t de dos muestras.

3. RESULTADOS

En primer lugar, se realizaron las mediciones experimentales de la solución de control de ruido propuesta, obteniendo los siguientes resultados:

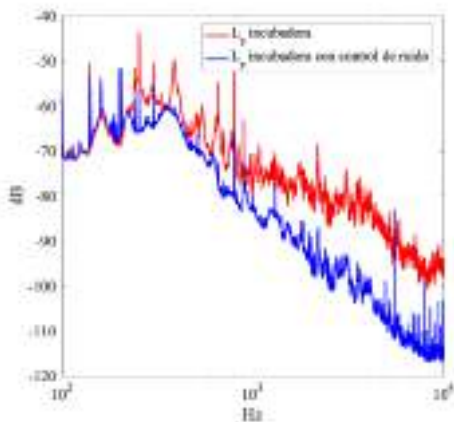


Figura 2. Mediciones de ruido aéreo. La medición muestra los efectos de la solución propuesta sobre el ruido de fondo. Línea roja: L_p medio normalizado de la incubadora de CO_2 en condiciones habituales de funcionamiento. Línea azul: L_p medio normalizado de la solución de control de ruido compuesta por un tratamiento a ruido aéreo y un sistema de aislamiento sobre la bandeja de cultivo.

A continuación, se exponen los resultados relativos a los ensayos biológicos descritos anteriormente (sección 2.5).

Tabla 1. Resumen estadístico en las distintas condiciones bajo estudio frente a la condición de *control*. La tabla muestra tanto los ensayos de proliferación celular (absorbancia) como el análisis de las imágenes de microscopía confocal tras ensayo de inmunocitoquímica (proteína Ki67).

Ensayo biológico	Condición	Estadístico
Proliferación celular	<i>voz emocional</i>	** $p < 0,01$
	<i>voz no emocional</i>	$p = 0,22$
	<i>voz emocional sintetizada</i>	$p = 0,44$
Inmunocitoquímica [brillo/píxel]	<i>voz emocional</i>	* $p < 0,05$

Los resultados evidencian una mayor proliferación así como una elevada expresión de Ki67 en la condición de voz emocional (agradecimiento) respecto a la condición de control. En el caso del ensayo de proliferación celular ($n=3$, 6 réplicas por placa), el valor medio de absorbancia es de $0,7106 \pm 0,0331$ para la condición de control y $0,7976 \pm 0,0539$ para la condición de voz emocional (** $p < 0,01$). En cuanto a la prueba inmunocitoquímica se refiere ($n=9$ regiones de interés aleatorias), el valor medio de brillo por píxel es de

$0,309 \pm 0,017$ para la condición de control y $0,466 \pm 0,015$ para la condición de voz emocional.

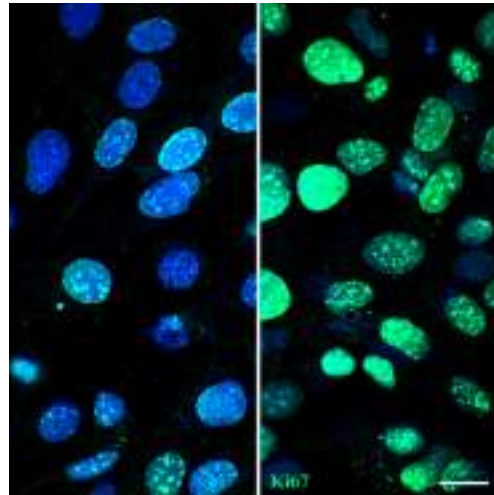


Figura 3. Imágenes obtenidas mediante microscopía confocal para la proteína Ki67. La fotografía de la izquierda hace referencia a la condición de *control*, mientras la fotografía de la derecha corresponde a la condición *voz emocional* (agradecimiento). La elevada presencia de fluorescencia en la condición *voz emocional* (color verde) indica una mayor expresión de Ki67.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las emociones son un fenómeno multimodal que afecta a la voz humana [11], [12]. La experiencia emocional modifica las características del aparato fonador [13]–[15] influyendo sobre los parámetros físicos y acústicos de la voz humana [16]–[19]. En la literatura, existe una amplia evidencia de que la energía sonora es capaz de inducir cambios significativos a nivel celular y genético [37], [44], [45]. El presente trabajo estudia si los cambios físico-acústicos ocasionados por una emoción de agradecimiento sobre la voz humana puede influir en la proliferación celular y la expresión de Ki67 de la línea celular 661W (no auditiva).

A la vista de los resultados, los cambios físico-acústicos originados por respuestas emocionales de agradecimiento codificadas en la voz humana, podrían influir de manera significativa en la proliferación celular ($p < 0,01$) y la expresión de Ki67 ($p < 0,05$). Con el fin de asegurar que estos efectos no se deben a las características intrínsecas de la voz del participante, se diseñó la condición “estímulo no emocional” en la cual el mismo sujeto registró las primeras 300 palabras de “El Quijote” ($p = 0,22$). Así mismo, se sintetizó un nuevo estímulo “voz emocional sintetizada” a partir del texto emocional sin característica acústico-afectiva asociada ($p = 0,44$). En conclusión, los resultados preliminares apuntan a la posibilidad de que las características físico-emocionales de la voz humana podrían influir significativamente sobre la proliferación celular y la expresión de Ki67 de la línea celular 661W.

Consideramos la posibilidad de que los efectos sobre la proliferación y la expresión proteica descritos puedan ser específicos de la línea celular 661W. Sin embargo, la literatura muestra cómo diferentes líneas celulares en humanos, ratones, levaduras o bacterias son sensibles a las ondas mecánicas [42], [44], [55]–[58], por lo que resultaría poco probable. Es necesaria más investigación al respecto.

La principal limitación de esta prueba piloto, es la necesidad de ampliar la muestra ($n=1$). También sería aconsejable aumentar el número de estímulos acústico-emocionales (ira, miedo o alegría). Con todo, y atendiendo a los resultados preliminares, el estudio del efecto de las ondas acústico-emocionales sobre la biología celular es un campo inexplorado que podría arrojar luz en la comprensión de cómo la cognición humana interacciona con la biología a través de las leyes de la física.

REFERENCIAS

- [1] C. Darwin, *The Expression of the Emotions in Man and Animals*. Cambridge University Press, 2013.
- [2] P. Ekman, “Are there basic emotions?,” *Psychol Rev*, vol. 99, no. 3, pp. 550–553, 1992.
- [3] K. Scherer, T. Johnstone, and G. Klasmeyer, *Vocal expression of emotion*. Handbook of affective sciences. Oxford University Press, 2003. Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: <https://psycnet.apa.org/record/2009-07773-023>.
- [4] J. A. Russell, J. A. Bachorowski, and J. M. Fernández-Dols, “Facial and Vocal Expressions of Emotion,” *Annu Rev Psychol*, vol. 54, pp. 329–349, 2003.
- [5] R. Banse and K. R. Scherer, “Acoustic profiles in vocal emotion expression,” *J Pers Soc Psychol*, vol. 70, no. 3, pp. 614–636, 1996.
- [6] S. P. Whiteside, “Acoustic characteristics of vocal emotions simulated by actors,” *Percept Mot Skills*, vol. 89, no. 3 Pt 2, pp. 1195–1208, 1999.
- [7] A. Schirmer and R. Adolphs, “Emotion Perception from Face, Voice, and Touch: Comparisons and Convergence,” *Trends Cogn Sci*, vol. 21, no. 3, pp. 216–228, Mar. 2017.
- [8] P. Ekman, “Facial expressions of emotion: an old controversy and new findings,” *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, vol. 335, no. 1273, pp. 63–69, 1992.
- [9] T. Johnstone and K. R. Scherer, *Vocal communication of emotion*. New York: In Handbook of Emotions. Guilford Press, 2000.
- [10] K. R. Scherer, *Vocal correlates of emotional arousal and affective disturbance*. In H. Wagner & A. Manstead (Eds.), *Handbook of social psychophysiology*. John Wiley & Sons, 1989.
- [11] M. Pietrowicz, M. Hasegawa-Johnson, and K. G. Karahalios, “Acoustic correlates for perceived effort levels in male and female acted voices,” *J Acoust Soc Am*, vol. 142, no. 2, pp. 792–811, Aug. 2017.
- [12] S. R. Kadirí and P. Alku, “Glottal features for classification of phonation type from speech and neck surface accelerometer signals,” *Comput Speech Lang*, vol. 70, p. 101232, Nov. 2021.
- [13] I. Grichkovtsova, M. Morel, and A. Lacheret, “The role of voice quality and prosodic contour in affective speech perception,” *Speech Commun*, vol. 54, no. 3, pp. 414–429, Mar. 2012.
- [14] C. Gobl and A. Ní Chasaide, “The role of voice quality in communicating emotion, mood and attitude,” *Speech Commun*, vol. 40, no. 1–2, pp. 189–212, Apr. 2003.
- [15] P. Birkholz, L. Martin, K. Willmes, B. J. Kröger, and C. Neuschaefer-Rube, “The contribution of phonation type to the perception of vocal emotions in German: an articulatory synthesis study,” *J Acoust Soc Am*, vol. 137, no. 3, pp. 1503–1512, Mar. 2015.
- [16] J. Kuang and M. Liberman, “Integrating Voice Quality Cues in the Pitch Perception of Speech and Non-speech Utterances,” *Front Psychol*, vol. 9, no. NOV, Nov. 2018.
- [17] D. N. Honorof and D. H. Whalen, “Perception of pitch location within a speaker’s F0 range,” *J Acoust Soc Am*, vol. 117, no. 4 Pt 1, pp. 2193–2200, Apr. 2005.
- [18] C.-Y. Lee, L. Dutton, and G. Ram, “The role of speaker gender identification in relative fundamental frequency height estimation from multispeaker, brief speech segments,” *J Acoust Soc Am*, vol. 128, no. 1, pp. 384–388, Jul. 2010.
- [19] P. Lieberman and S. B. Michaels, “Some Aspects of Fundamental Frequency and Envelope Amplitude as Related to the Emotional Content of Speech,” *J Acoust Soc Am*, vol. 34, no. 7, pp. 922–927, Jul. 1962.
- [20] C. Sobin and M. Alpert, “Emotion in Speech: The Acoustic Attributes of Fear, Anger, Sadness, and Joy,” *Journal of Psycholinguistic Research* 1999 28:4, vol. 28, no. 4, pp. 347–365, 1999.
- [21] P. N. Juslin and P. Laukka, “Communication of Emotions in Vocal Expression and Music Performance: Different Channels, Same Code?,” *Psychol Bull*, vol. 129, no. 5, pp. 770–814, Sep. 2003.
- [22] P. N. Juslin and K. R. Scherer, *Vocal expression of affect*. In J. A. Harrigan, R. Rosenthal, & K. R. Scherer (Eds.), *The new handbook of methods in nonverbal behavior research*. Oxford University Press, 2005.
- [23] C. Breitenstein, D. Van Lancker, and I. Daum, “The contribution of speech rate and pitch variation to the perception of vocal emotions in a German and an American sample,” *Cognition and Emotion*, vol. 15, no. 1, pp. 57–79, 2010.
- [24] A. Davletcharova, S. Sugathan, B. Abraham, and A. P. James, “Detection and Analysis of Emotion from Speech Signals,” *Procedia Comput Sci*, vol. 58, pp. 91–96, Jan. 2015.
- [25] D. France, R. Shiavi, Silverman. D, Silverman. M, and Wilkes. DM, “Acoustical properties of speech as indicators of depression and suicidal risk,” *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 47, no. 7, pp. 829–837, 2000.
- [26] W. Pan *et al.*, “Re-examining the robustness of voice features in predicting depression: Compared with baseline of confounders,” *PLoS One*, vol. 14, no. 6, Jun. 2019.
- [27] A. Ozdas, R. G. Shiavi, S. E. Silverman, M. K. Silverman, and D. M. Wilkes, “Investigation of vocal jitter and glottal flow spectrum as possible cues for depression and near-term suicidal risk,” *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 51, no. 9, pp. 1530–1540, Sep. 2004.
- [28] N. Cummins, J. Epps, M. Breakspear, and R. Goecke, “An investigation of depressed speech detection: Features and normalization,” *Proceedings of the Annual Conference of*

- the International Speech Communication Association, INTERSPEECH*, pp. 2997–3000, 2011.
- [29] Y. Kim and Y. Choi, “A Cross-Language Study of Acoustic Predictors of Speech Intelligibility in Individuals With Parkinson’s Disease,” *J Speech Lang Hear Res*, vol. 60, no. 9, p. 2506, Sep. 2017.
- [30] G. Weismer, J. S. Laures, J. Y. Jeng, R. D. Kent, and J. F. Kent, “Effect of speaking rate manipulations on acoustic and perceptual aspects of the dysarthria in amyotrophic lateral sclerosis,” *Folia Phoniatr Logop*, vol. 52, no. 5, pp. 201–219, 2000.
- [31] G. Weismer, J. Y. Jeng, J. S. Laures, R. D. Kent, and J. F. Kent, “Acoustic and intelligibility characteristics of sentence production in neurogenic speech disorders,” *Folia Phoniatr Logop*, vol. 53, no. 1, pp. 1–18, 2001.
- [32] N. Cullum and Z. Liu, “Therapeutic ultrasound for venous leg ulcers,” *Cochrane Database Syst Rev*, vol. 5, no. 5, May 2017.
- [33] S. Johnson, “Low-frequency ultrasound to manage chronic venous leg ulcers,” *Br J Nurs*, vol. 12, no. 19 Suppl, 2003.
- [34] P. G. De Deyne and M. Kirsch-Volders, “In vitro effects of therapeutic ultrasound on the nucleus of human fibroblasts,” *Phys Ther*, vol. 75, no. 7, pp. 629–634, 1995.
- [35] J. C. Lee Ying, J. Dayou, and C. K. Phin, “Experimental Investigation on the Effects of Audible Sound to the Growth of *Escherichia coli*,” *Mod Appl Sci*, vol. 3, no. 3, Feb. 2009.
- [36] N. Lestard, R. Valente, A. Lopes, and M. A. M. Capella, “Direct effects of music in non-auditory cells in culture,” *Noise Health*, vol. 15, no. 66, pp. 307–314, Sep. 2013.
- [37] C. D. Lin *et al.*, “Sounds Stimulation on In Vitro HL1 Cells: A Pilot Study and a Theoretical Physical Model,” *Int J Mol Sci*, vol. 22, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2021.
- [38] H. C. Zhao, J. Wu, B. S. Xi, and B. C. Wang, “Effects of sound-wave stimulation on the secondary structure of plasma membrane protein of tobacco cells,” *Colloids Surf B Biointerfaces*, vol. 25, no. 1, pp. 29–32, May 2002.
- [39] H. C. Zhao *et al.*, “Effect of sound stimulation on *Dendranthema morifolium* callus growth,” *Colloids Surf B Biointerfaces*, vol. 29, no. 2–3, pp. 143–147, Jun. 2003.
- [40] N. R. Lestard and M. A. M. Capella, “Exposure to Music Alters Cell Viability and Cell Motility of Human Nonauditory Cells in Culture,” *Evid Based Complement Alternat Med*, vol. 2016, 2016.
- [41] N. Sarvaiya and V. Kothari, “Audible sound in form of music can influence microbial growth, metabolism and antibiotic susceptibility,” *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, vol. Volume 2, no. Issue 6, Apr. 2017.
- [42] T. Mohammed, M. F. Murphy, F. Lilley, D. R. Burton, and F. Bezombes, “The effects of acoustic vibration on fibroblast cell migration,” *Materials Science and Engineering: C*, vol. 69, pp. 1256–1262, Dec. 2016.
- [43] Y. Choi, J. E. Park, J. S. Jeong, J. K. Park, J. Kim, and S. Jeon, “Sound Waves Induce Neural Differentiation of Human Bone Marrow-Derived Mesenchymal Stem Cells via Ryanodine Receptor-Induced Calcium Release and Pyk2 Activation,” *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 180, no. 4, pp. 682–694, Oct. 2016.
- [44] M. Kumeta, D. Takahashi, K. Takeyasu, and S. H. Yoshimura, “Cell type-specific suppression of mechanosensitive genes by audible sound stimulation,” *PLoS One*, vol. 13, no. 1, p. e0188764, Jan. 2018.
- [45] D. Kwak, T. Combriat, C. Wang, H. Scholz, A. Danielsen, and A. R. Jensenius, “Music for Cells? A Systematic Review of Studies Investigating the Effects of Audible Sound Played Through Speaker-Based Systems on Cell Cultures,” *Music and Science*, vol. 5, Mar. 2022.
- [46] R. S. Lazarus and B. N. Lazarus, *Passion and Reason: Making Sense of Our Emotions*. New York (USA): Oxford University Press, 1994.
- [47] M. E. McCullough, R. A. Emmons, and J.-A. Tsang, “The grateful disposition: a conceptual and empirical topography,” *J Pers Soc Psychol*, vol. 82, no. 1, pp. 112–127, Jan. 2002.
- [48] N. M. Lambert and F. D. Fincham, “Expressing gratitude to a partner leads to more relationship maintenance behavior,” *Emotion*, vol. 11, no. 1, pp. 52–60, Feb. 2011.
- [49] S. M. Toepfer and K. Walker, “Letters of gratitude: Improving well-being through expressive writing,” *J Writ Res*, vol. 1, no. 3, pp. 181–198, Nov. 2009.
- [50] F. Triaud, D. H. Clenet, Y. Cariou, T. Le Neel, D. Morin, and A. Truchaud, “Evaluation of Automated Cell Culture Incubators,” *SLAS Technol*, vol. 8, no. 6, pp. 82–86, Dec. 2003.
- [51] E. Tan, X. Q. Ding, A. Saadi, N. Agarwal, M. I. Naash, and M. R. Al-Ubaidi, “Expression of cone-photoreceptor-specific antigens in a cell line derived from retinal tumors in transgenic mice,” *Invest Ophthalmol Vis Sci*, vol. 45, no. 3, pp. 764–768, Mar. 2004.
- [52] Z. Sayyad, K. Sirohi, V. Radha, and G. Swarup, “661W is a retinal ganglion precursor-like cell line in which glaucoma-associated optineurin mutants induce cell death selectively,” *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017.
- [53] I. Mickuviene, V. Kirveliėne, and B. Juodka, “Experimental survey of non-clonogenic viability assays for adherent cells in vitro,” *Toxicology in Vitro*, vol. 18, no. 5, pp. 639–648, 2004, doi: 10.1016/j.tiv.2004.02.001.
- [54] X. Sun and P. D. Kaufman, “Ki-67: more than a proliferation marker,” *Chromosoma*, vol. 127, no. 2, p. 175, Jun. 2018.
- [55] N. Navarro-Fernández, “Caracterización y cuantificación de la influencia de la música como agente físico sobre el comportamiento de células madre neurales embrionarias en cultivo,” Universidad de Valladolid, 2010. Accessed: Jul. 04, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=295435&info=resumen&idioma=SPA>
- [56] R. B. M. Aggio, V. Obolonkin, and S. G. Villas-Bôas, “Sonic vibration affects the metabolism of yeast cells growing in liquid culture: A metabolomic study,” *Metabolomics*, vol. 8, no. 4, pp. 670–678, Aug. 2012.
- [57] G. Shaobin *et al.*, “A pilot study of the effect of audible sound on the growth of *Escherichia coli*,” *Colloids Surf B Biointerfaces*, vol. 78, no. 2, pp. 367–371, Jul. 2010.
- [58] H. Jones, L. Feth, D. Rumpf, A. Hefti, and A. Mariotti, “Acoustic energy affects human gingival fibroblast proliferation but leaves protein production unchanged,” *J Clin Periodontol*, vol. 27, no. 11, pp. 832–838, Nov. 2000.

REDUCCIÓN DEL RUIDO DE RODADURA FERROVIARIO MEDIANTE DISPOSITIVOS AMORTIGUADORES DE CAPA RESTRINGIDA CONSIDERANDO MODELOS VISCOELÁSTICOS INTEGRALES

Xavier Garcia-Andrés^{1*}

José Martínez-Casas¹

Francisco David Denia¹

Astrid Pieringer²

Wolfgang Kropp²

¹ Instituto de Ingeniería Mecánica y Biomecánica (I2MB), Universitat Politècnica de València, Valencia, España

² Division of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia

RESUMEN

En el presente trabajo se modeliza el comportamiento vibroacústico de una rueda ferroviaria que incorpora un dispositivo amortiguador de capa restringida (constrained layer damping - CLD). Este mecanismo de control de vibraciones y ruido, compuesto por una capa de material viscoelástico situada entre el velo de la rueda y una capa externa encargada de mantenerla restringida contra este, se ha mostrado como un método eficaz para reducir el ruido de rodadura. Para su estudio, se ha desarrollado una metodología que combina el uso de modelos viscoelásticos avanzados, capaces de considerar la dependencia de las propiedades del material con la frecuencia, con un modelo vibroacústico integral de la rueda, capaz de tener en cuenta la axisimetría (con vistas a reducir el coste computacional) y los efectos giroscópicos del sistema, entre otros aspectos. Con la herramienta desarrollada, se ha calculado la variación del nivel de potencia acústica radiada por la rueda con amortiguamiento para distintas configuraciones de capa viscoelástica, mostrando sus buenas prestaciones.

ABSTRACT

The present work models the vibroacoustic behaviour of a railway wheel incorporating a constrained layer damping (CLD) device. This vibration and noise control mechanism, consisting of a layer of viscoelastic material placed between the wheel web and an external layer in charge of keeping it constrained on the web, has been shown to be an effective method for reducing rolling noise. In order to study such a technique, a methodology has been developed that combines the use of advanced viscoelastic models, which can consider

the dependence of material properties with the frequency, with a comprehensive vibroacoustic model of the wheel, capable of taking into account axisymmetry (aiming to reduce the computational cost) and the gyroscopic effects of the system, among other factors. With the developed tool, the variation of the sound power level radiated by the damped wheel for different viscoelastic layer configurations has been computed, showing its good performance.

Palabras Clave— Ruido, rueda, ferrocarril, amortiguamiento de capa restringida, viscoelasticidad.

1. INTRODUCCIÓN

El ferrocarril es un medio de transporte eficaz y poco contaminante que, ante la inminente necesidad que tenemos como sociedad de reducir nuestras emisiones de gases contaminantes y hacer frente al cambio climático, está llamado a desempeñar un papel cada vez más importante en el transporte de mercancías y personas. Sin embargo, el ruido de rodadura se ha destacado como una fuente principal de contaminación acústica en áreas urbanas, lo que puede tener un impacto significativo en la calidad de vida de los residentes y se relaciona con la aparición de problemas severos de salud cuando se sobrepasan ciertos niveles [1].

Para hacer frente a esta situación, se han explorado distintas soluciones como, por ejemplo, el cambio a zapatas de freno de material compuesto en los trenes de mercancías [2], la búsqueda de diseños óptimos para ruedas y vías desde el punto de vista acústico [3, 4, 5], la aplicación de soluciones de amortiguación como las ruedas resilientes [6], los amortiguadores de tipo sándwich [7, 8] y el uso de dispositivos amortiguados de capa restringida (CLD) [9].

* **Autor de contacto:** xagaran@upv.es

Copyright: ©2023 X. Garcia-Andrés et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Específicamente, la utilización de CLD se ha mostrado como un método muy prometedor para la reducción del ruido en la rueda [9, 10], con reducciones observadas de hasta 10 dB [11]. El diseño de este tipo de dispositivos consiste en una capa de un material polimérico viscoelástico combinada con una lámina metálica, encargada de restringir la deformación de la primera capa, que se encuentra unida con la estructura que se pretende amortiguar, en el caso que nos ocupa, la rueda. Al generarse vibración, se produce cizallamiento en la capa viscoelástica con la consiguiente disipación energética y reducción de la radiación acústica asociada [12]. Por consiguiente, para una descripción precisa de la radiación acústica de la rueda cuando está presente un CLD, es necesario caracterizar adecuadamente la viscoelasticidad del material polimérico, incluida la dependencia con la frecuencia de sus propiedades. Los modelos clásicos utilizados para ello, tales como los de Maxwell y Kelvin-Voigt, no representan completamente todo el espectro del comportamiento viscoelástico. Por lo tanto, se requiere el desarrollo e implementación de aproximaciones más realistas del comportamiento del material, como los modelos de Zener [13] y Burgers [14], capaces de considerar tanto la deformación elástica como la plástica de este tipo de materiales. Dicha inclusión de la viscoelasticidad y la dependencia de sus propiedades con la frecuencia implica también que el cálculo modal será de naturaleza no-lineal [15].

En el presente trabajo se propone una metodología capaz de calcular el ruido de rodadura radiado por una rueda ferroviaria con un tratamiento CLD, considerando conjuntamente el comportamiento viscoelástico dependiente de la frecuencia del material polimérico y un modelo vibroacústico integral completamente axisimétrico de una rueda en rotación. Para el cálculo de las propiedades modales, además, se considera un algoritmo iterativo de cálculo de autovalores (*Iterative Eigenvalue Solver* - IES). Posteriormente, se calculan diferentes configuraciones de rueda y CLD, y se estudian las variaciones en la radiación acústica resultante cuando se toma como referencia una rueda sin CLD.

2. METODOLOGÍA

Para el cálculo del ruido de rodadura emitido por una rueda con CLD, se utiliza un modelo vibroacústico capaz de obtener el campo vibratorio de la superficie, combinado con la incorporación de modelos de viscoelasticidad avanzados para la caracterización del CLD que consideran la dependencia de las propiedades del material con la frecuencia. Para una descripción más exhaustiva del modelo vibroacústico, se remite al lector al trabajo de Andrés *et al.* [16]. El modelo dinámico utilizado considera una rueda en rotación y tiene en cuenta tanto los efectos del movimiento de sólido rígido del eje montado como la flexibilidad de la rueda y los efectos giroscópicos e inerciales asociados a la rotación. La inclusión

de las propiedades axisimétricas de la rueda garantiza una descripción precisa del comportamiento vibroacústico completo en tres dimensiones a partir de un marco de referencia bidimensional como es la sección transversal de la rueda, aumentando considerablemente la eficiencia computacional [16]. De esta forma, la respuesta \vec{w} de la rueda girando a una velocidad constante Ω siendo excitada por una fuerza de contacto \vec{F}_c a una frecuencia angular ω se expresará mediante:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + 2i\omega\Omega \mathbf{V} + \mathbf{K} + i\omega \mathbf{C} + \Omega^2 \mathbf{A}) \vec{w} = \vec{F}_c \quad (1)$$

donde \mathbf{M} , \mathbf{K} y \mathbf{C} son las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, respectivamente, la matriz \mathbf{V} representa la fuerza inercial a causa de la aceleración de Coriolis y \mathbf{A} está relacionada con la aceleración convectiva [17]. Estas matrices se expresarán como una función del número de diámetros nodales de cada uno de los modos de vibración considerados durante el cálculo. Para la obtención de la fuerza de contacto \vec{F}_c , se tiene en cuenta el comportamiento dinámico global de todos los componentes que intervienen en la interacción rueda/vía [18].

Se debe tener en cuenta que, debido a la inclusión de un material viscoelástico dependiente de la frecuencia en el CLD, las matrices que rigen la dinámica del sistema también presentarán esta dependencia. Por tanto, será necesario evaluar las matrices de la Ec. (1) para cada frecuencia considerada en el cálculo del nivel de potencia acústica (*Sound poWer Level* – SWL o L_w). Esta dependencia con la frecuencia también deberá ser tenida en cuenta para la obtención de las propiedades modales. Además, las propiedades viscoelásticas se caracterizan mediante la consideración de una rigidez compleja, tal y como se explica en la Sección 2.1, obteniéndose así una matriz de rigidez compleja \mathbf{K}^* . Para el cálculo de los modos de vibración $\vec{\psi}_n$, las frecuencias naturales ω_n y el respectivo factor de pérdidas del modo ξ_n , utilizaremos el IES [19] para la resolución de la ecuación modal

$$(\lambda_n^{*2} \mathbf{M} + \mathbf{K}^*(\omega)) \vec{\psi}_n = 0 \quad (2)$$

donde λ_n^* es el autovalor complejo correspondiente al modo n , definido como $\lambda_n^{*2} = \omega_n^2 (1 + i \xi_n)$ [19].

Para resolver la Ec. (2), se considerará que una frecuencia ω corresponde a una frecuencia natural ω_n cuando el error absoluto $\delta_n = \omega - \omega_n = \epsilon_{tol}$, donde la tolerancia $\epsilon_{tol} = 1 \cdot 10^{-9}$. Así, el IES consistirá en un proceso iterativo en el que, para cada uno de los modos considerados, se realizará un proceso de optimización que minimizará el correspondiente δ_n , usando para ello el método de la secante.

Seguidamente, podremos resolver la dinámica del sistema y obtener la velocidad de vibración en cada punto de la

superficie de la rueda. A partir de ello, se calculará la potencia acústica radiada como [16, 20]

$$W_w = \rho_{air} c_{air} \sum_n (\sigma_{z,n} S_z \langle \widetilde{v_{z,n}^2} \rangle + \sigma_{r,n} S_r \langle \widetilde{v_{r,n}^2} \rangle) \quad (3)$$

donde ρ_{air} es la densidad del aire, c_{air} hace referencia a la velocidad del sonido en el aire, $\sigma_{i,n}$ se define como la eficiencia de radiación [20] del modo n en la dirección $i = z, r$, los términos S_z y S_r corresponden a las proyecciones de la superficie de la rueda en la dirección z axial y r radial, respectivamente, y $\langle \widetilde{v_{i,n}^2} \rangle$ es la velocidad cuadrática de la superficie de la rueda promediada en el espacio y el tiempo para el modo n en la dirección $i = z, r$.

El nivel de potencia acústica se expresará como

$$SWL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_w}{W_0} \right) + A_{filtro} \quad (4)$$

siendo A_{filtro} el filtro para la ponderación de decibelio A y $W_0 = 10^{-12}$ W.

2.1. Modelos de comportamiento viscoelástico

Para un correcto análisis cuando se considera un CLD, debe de describirse de manera adecuada el comportamiento de la capa polimérica. Más concretamente, dicho material presentará un comportamiento viscoelástico, a medio camino entre los materiales elásticos lineales (con una relación proporcional entre tensión y deformación) y los líquidos viscosos (los cuales presentan resistencia al cizallamiento y a la deformación ante tensiones aplicadas).

Esto se caracterizará mediante la consideración de una rigidez compleja,

$$k_{vl} = k' + ik'' = k'(1 + i\eta_{vl}) \quad (5)$$

donde k' es la rigidez del material en función de la frecuencia y $\eta_{vl} = \frac{k''}{k'}$ es el factor de pérdidas, definido como la ratio entre energía disipada y energía potencial máxima por radián [21].

A la hora de determinar la rigidez compleja k_{vl} del material viscoelástico, en este trabajo se han considerado los modelos de Zener y Burgers, representados de manera esquemática en la Figura 1.

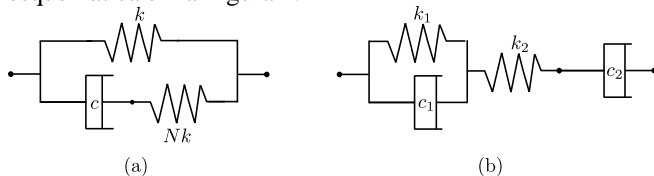


Figura 1. Esquema de los elementos considerados para definir la rigidez compleja k_{vl} para el modelo de (a) Zener y (b) Burgers.

Cuando se considera una aproximación de Zener [13], representada en la Figura 1(a), la rigidez compleja se definirá a partir de la combinación de un elemento elástico y otro amortiguador viscoso en serie, conjuntamente con otro elemento elástico en paralelo. Así, las componentes de k_{vl} se podrán expresar como

$$k' = \frac{k(1 + (N+1)[\omega c/(Nk)]^2)}{1 + [\omega c/(Nk)]^2} \quad (6)$$

$$\eta_{vl} = \frac{\omega c}{k(1 + (N+1)[\omega c/(Nk)]^2)}$$

En cuanto al modelo de Burgers [14], mostrado en la Figura 1(b), está compuesto por dos elementos en serie: uno de Maxwell, definido como un elemento elástico y un elemento amortiguador viscoso en serie, y otro de Kelvin-Voigt, formado por un elemento elástico y un elemento amortiguador viscoso en paralelo. De este modo, las componentes de k_{vl} vendrán dadas por

$$k' = \frac{\omega^2 c_2^2 k_2 [k_1(k_1 + k_2) + c_1^2 \omega^2]}{k_1^2 k_2^2 + [c_1^2 k_1^2 + 2c_1 c_2 k_2^2 + c_2^2 (k_1 + k_2)^2] \omega^2 + c_1^2 c_2^2 \omega^4} \quad (7)$$

$$\eta_{vl} = \frac{k_2 [k_1^2 + c_1(c_1 + c_2) \omega^2]}{\omega c_2 [k_1(k_1 + k_2) + c_1^2 \omega^2]}$$

3. CONFIGURACIÓN DE RUEDA CON CDL Y VÍA

En los cálculos presentados en este trabajo se ha considerado un tren operando a una velocidad de $V = 80$ km/h sobre un carril compuesto por una vía UIC60 sobre una base continua, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 1.

Respecto a la configuración de rueda con CLD, se ha usado una rueda de velo recto con un radio $r_w = 0.45$ m y perfil S1002. El CLD se encuentra dispuesto sobre ambas superficies del velo de la rueda y está compuesto por una capa de material viscoelástico con un espesor de $d_{vl} = 0.001$ m y una capa externa de $d_{cl} = 0.001$ m de acero. Las propiedades de los materiales considerados se muestran en la Tabla 1, excepto el módulo de Young del material

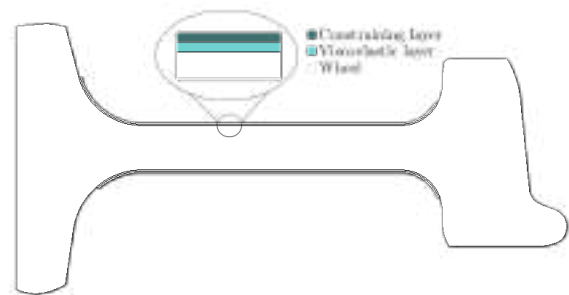


Figura 2. Sección transversal de la rueda con CLD considerada.

viscoelástico E_{vl} , que vendrá definido por la rigidez compleja k_{vl} obtenida según los modelos de material viscoelásticos descritos en la Sección 2.1. A modo ilustrativo, en la Figura 2 se muestra de manera esquemática la sección transversal de la rueda con CDL.

Tabla 1 Configuración de parámetros de CLD y base del carril

Capa viscoelástica		Capa externa	
Densidad ρ_{vl}	1340 kg/m ³	Densidad ρ_{cl}	7850 kg/m ³
Coefficiente de Poisson ν_{vl}	0.49	Coefficiente de Poisson ν_{cl}	0.3
Espesor d_{vl}	0.001 m	Espesor d_{cl}	0.001 m
		Módulo de Young E_{cl}	$2.1 \cdot 10^{11}$ N/m ²
		Factor de pérdidas η_{cl}	$1 \cdot 10^4$
Base		Vertical	Lateral
Rigidez de la placa de asiento k_p		$7.15 \cdot 10^8$ N/m ²	$5.5 \cdot 10^7$ N/m ²
Factor de pérdidas de la placa de asiento η_p		0.375	0.375
Rigidez del balasto k_b		$7.0 \cdot 10^7$ N/m ²	$3.5 \cdot 10^7$ N/m ²
Factor de pérdidas del balasto η_b		1.5	1.5
Masa de la traviesa por unidad de longitud m_{sl}	205 kg/m		

En cuanto a la interacción rueda/carril, se ha considerado una carga normal $F_0 = 50$ kN y una rugosidad definida de acuerdo con la norma EN 13979-1 [22], tomando en cuenta el filtro de contacto descrito en [18].

4. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos con la metodología propuesta de cálculo de SWL para la rueda con CLD. Usando la configuración de rueda descrita en la sección 3, se calculará la potencia acústica considerando los casos de comportamiento del material viscoelástico mediante el modelo de Zener y de Burgers y a continuación, se compararán con el SWL que se obtendría para la misma configuración de rueda si no se incorporara el CLD.

Cabe precisar que para todos los cálculos se han usado mallas compuestas por elementos finitos cuadráticos con un tamaño máximo de elemento de $h = 0.03$ m, considerando un total de 2466 grados de libertad (en la sección 2D).

Así, en el caso en que se considera una aproximación de Burgers, las propiedades de la capa de material polimérico se han definido con valores $k_1 = 4.29 \cdot 10^9$ N/m, $c_1 = 8.55 \cdot 10^5$ N s/m, $k_2 = 6.6 \cdot 10^{10}$ N/m y $c_2 = 4.44 \cdot 10^6$ N s/m.

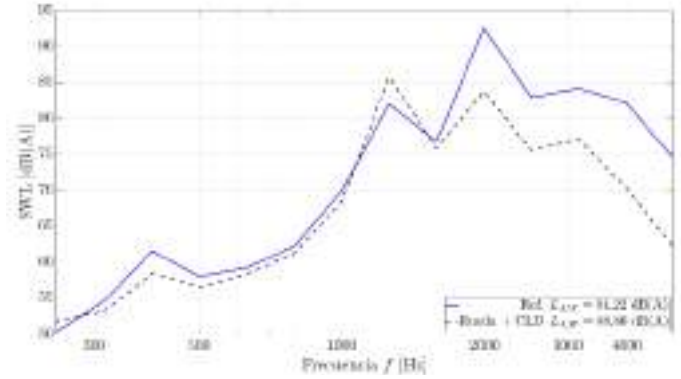


Figura 3. SWL de la rueda de referencia (—) y la rueda con CLD incorporado (- -) considerando el modelo de Burgers.

Tanto para este caso como cuando se considera el modelo de Zener, los parámetros que definen el comportamiento viscoelástico se han seleccionado con el objetivo de, en una primera aproximación, tratar de maximizar el amortiguamiento resultante en las frecuencias correspondientes a los modos de vibración de la rueda de referencia, buscando por tanto reducir la emisión de ruido en las regiones donde es más relevante. Si se observa el SWL resultante para este caso, expuesto en la Figura 3 y expresado en bandas de tercio de octava, se puede apreciar cómo se producen una disminución en la potencia acústica respecto a los valores de referencia, especialmente en el rango de altas frecuencias donde la contribución de la rueda al ruido de rodadura es más relevante. Así, la reducción total de ruido conseguida con el uso de CLD para este caso es de $\Delta L_{A,W} = 5.42$ dB(A), con la mayor parte de la mejora produciéndose a partir de la banda de 2000 Hz.

Cuando se considera el modelo de Zener, por otro lado, las propiedades del material viscoelástico consideradas son en este caso $k = 1.0 \cdot 10^9$ N/m, $c = 3.54 \cdot 10^5$ N s/m y $N = 15$. En la Figura 4 se muestra el SWL en bandas de tercio de octava obtenido para dicha configuración de rueda. La reducción de ruido de rodadura observada comparada con el caso de referencia es en este caso de $\Delta L_{A,W} = 5.10$ dB(A). De nuevo, la mayor parte de la reducción del ruido se da en las bandas de altas frecuencias.

Además de concentrar la reducción del ruido a partir de la banda de 2000 Hz, otro fenómeno que se puede observar tanto en la Figura 3 como en la Figura 4 es la aparición de un incremento de la radiación acústica en la banda de 1250 Hz. Con la introducción del CLD, se incrementa la participación del modo situado en la respectiva banda de tercio de octava, lo que se corresponde con el aumento de la potencia acústica en esa región. Aun así, dicho fenómeno no es significativo en comparación con la reducción total obtenida del ruido de rodadura.

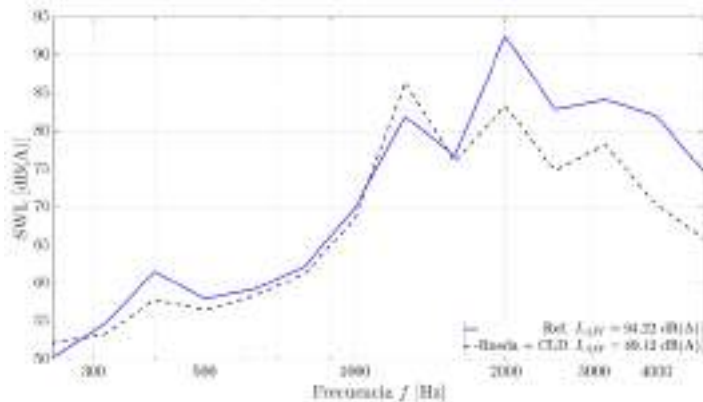


Figura 4. SWL de la rueda de referencia (—) y la rueda con CLD incorporado (- -) considerando el modelo de Zener.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología de cálculo de la potencia acústica radiada correspondiente al ruido de rodadura de una rueda de ferrocarril cuando se aplica un dispositivo amortiguador de capa restringida (CLD) sobre la superficie del velo. Para ello, se combina un modelo vibroacústico integral de la rueda con modelos viscoelásticos avanzados de material, como Burgers y Zener, así como el uso de un método de cálculo iterativo para la resolución de la ecuación modal, dependiente de la frecuencia, debido a las propiedades viscoelásticas de la CLD. La comparación del comportamiento acústico de la rueda con CLD y el asociado a la de la rueda de referencia, muestra que la primera ofrece mejoras en el nivel total de potencia acústica radiada. En concreto, se han obtenido los valores $\Delta L_{A,W} = 5.42$ dB(A) y $\Delta L_{A,W} = 5.10$ dB(A) cuando se consideran los modelos de Burgers y Zener, respectivamente. Las reducciones se concentran en el rango de altas frecuencias, donde la rueda es la principal fuente de ruido de rodadura. De este modo, se considera que la metodología propuesta es prometedora y tiene potencial para su desarrollo y posterior utilización en la búsqueda de configuraciones óptimas de rueda y CLD que minimicen la radiación acústica.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo recibido del Ministerio de Universidades, Unión Europea-Next Generation EU y la Universitat Politècnica de València (Margarita Salas, MS/35), la Ayuda para potenciar la investigación postdoctoral (PAID-PD-22) de la Universitat Politècnica de València, el proyecto PID2020-112886RA-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y el Programa PROMETEO/2021/046 de la Generalitat Valenciana.

7. REFERENCIAS

- [1] R. Guski, D. Schreckenber y R. Schuemer, «WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, 2017.
- [2] S. Bühler, «Methods and results of field testing of a retrofitted freight train with composite brake blocks,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 29 (3-5), pp. 1041-1050, 2006.
- [3] X. Garcia-Andrés, J. Gutiérrez-Gil, J. Martínez-Casas y F. D. Denia, «Wheel shape optimization approaches to reduce railway rolling noise,» *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 62 (5), pp. 2555 – 2570, 2020.
- [4] V. T. Andrés, J. Martínez-Casas, F. D. Denia y D. J. Thompson, «Influence study of rail geometry and track properties on railway rolling noise,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 525, pp. 116701, 2022.
- [5] J. Gutiérrez-Gil, X. Garcia-Andrés, J. Martínez-Casas, E. Nadal y F. D. Denia, «Optimized Perforation Schemes in Railway Wheels Toward Acoustic Radiation Mitigation,» *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 142 (4), pp. 041009, 2020.
- [6] A. Cigada, S. Manzoni y M. Vanali, «Vibro-acoustic characterization of railway wheels,» *Applied Acoustics*, vol. 69 (6), pp. 530-545, 2008.
- [7] I. Merideno, J. Nieto, N. Gil-Negrete, J. G. Giménez Ortiz, A. Landaberea y J. Iartza, «Theoretical prediction of the damping of a railway wheel with sandwich-type dampers,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333 (20), pp. 4897-4911, 2014.
- [8] I. Merideno, J. Nieto, N. Gil-Negrete, A. Landaberea y J. Iartza, «Constrained layer damper modelling and performance evaluation for eliminating squeal noise in trams,» *Shock and Vibration*, vol. 2014, pp. 473720, 2014.
- [9] C. J. C. Jones y D. J. Thompson, «Rolling noise generated by railway wheels with visco-elastic layers,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 231 (3), pp. 779-790, 2000.
- [10] J. C. O. Nielsen y C. R. Fredö, «Multi-disciplinary optimization of railway wheels,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293 (3), pp. 510-521, 2006.
- [11] S. Cervello, G. Donzella, A. Pola y M. Scepi, «Analysis and design of a low-noise railway wheel,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 215 (3), p. 179 – 192, 2001.
- [12] L. Cremer, M. Heckl y B. A. T. Petersson, «Damping,» de *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 149-235.
- [13] C. M. Zener, *Elasticity and anelasticity of metals*, University of Chicago Press, 1948.
- [14] N. Sugimoto y T. Kakutani, «'Generalized Burgers' equation' for nonlinear viscoelastic waves,» *Wave Motion*, vol. 7 (5), pp. 447-458, 1985.
- [15] L. Rouleau, J.-F. Deü y A. Legay, «A comparison of model reduction techniques based on modal projection for structures

- with frequency-dependent damping,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 90, p. 110 – 125, 2017.
- [16] V. T. Andrés, J. Martínez-Casas, F. .. D. Denia y D. J. Thompson, «A model of a rotating railway wheel for the prediction of sound radiation,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 553, p. 117667, 2023.
- [17] J. Martínez-Casas, L. Mazzola, L. Baeza y S. Bruni, «Numerical estimation of stresses in railway axles using a train-track interaction model,» *International Journal of Fatigue*, vol. 47, p. 18 – 30, 2013.
- [18] D. J. Thompson, *Railway Noise and Vibration. Mechanisms, modelling and means of control*, 1 ed., Elsevier, 2010.
- [19] M. Gröhlich, M. Böswald y J. Wallaschek, «Viscoelastic damping design – A novel approach for shape optimization of Constrained Layer Damping treatments at different ambient temperatures,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 555, pp. 117703, 2023.
- [20] D. J. Thompson y C. J. C. Jones, «Sound radiation from a vibrating railway wheel,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 253 (2), p. 401 – 419, 2002.
- [21] J. D. Irwin y E. R. Graf, *Industrial Noise and Vibration Control*, Prentice-Hall, 1979.
- [22] CEN, «Railway applications – Wheelsets and bogies – Monobloc wheels – Technical approval procedure – Part 1: Forged and rolled wheels. EN-13979-1:2020,» 2020.
- [23] J. Martínez-Casas, J. Giner-Navarro, L. Baeza y F. D. Denia, «Improved railway wheelset–track interaction model in the high-frequency domain,» *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 309, pp. 642-653, 2017.
- [24] R. R. Craig y A. J. Kurdila, *Fundamentals of Structural Dynamics*, 2 ed., Wiley, 2006.

ANÁLISIS DE PARÁMETROS CRÍTICOS EN LA CONFIGURACIÓN DE UN ENSAYO NO DESTRUCTIVO PARA MEMBRANAS

Antonia Lima-Rodriguez^{1*}

Luis Caminos¹

Antonio Gonzalez-Herrera¹

Jose Garcia-Manrique¹

¹Universidad de Málaga

RESUMEN

En este trabajo se analizan los distintos parámetros a determinar en la configuración de un ensayo dinámico no destructivo, cuya finalidad es obtener las propiedades mecánicas de membranas delgadas. Los ensayos tradicionales, algunas veces resultan no adecuados para estos materiales, por tratarse de ensayos destructivos o por utilizar materiales adicionales. Una alternativa a estos ensayos es la elección de un ensayo vibro-acústico no destructivo. Cuando una membrana delgada es sometida a una presión sonora, en ésta se genera una respuesta dinámica función de los modos de vibración de la misma. Se trata de un problema complejo, donde la relación entre las ondas sonoras y la respuesta de la membrana no es fácil de determinar, y requiere un estudio en profundidad para poder obtener esa interacción. Por este motivo es necesario estudiar los parámetros que influyen en la respuesta dinámica de la membrana, para tener la respuesta lo más determinada y acotada posible. Entre los parámetros a estudiar se pueden destacar: la posición de la fuente de sonido, la geometría y dimensiones de la membrana, los puntos a medir, el rango de frecuencias, entre otros. El estudio de estos parámetros es fundamental para determinar la configuración del ensayo dinámico.

ABSTRACT

In this work, the different parameters to be determined in the configuration of a non-destructive dynamic test are analyzed, whose purpose is to obtain the mechanical properties of thin membranes. Traditional tests are sometimes not suitable for these materials, because they are destructive tests or because they use additional materials. An alternative to these tests is the choice of a non-destructive vibro-acoustic test. When a thin membrane is subjected to sound pressure, a dynamic response is generated depending on its vibration modes. This is a complex problem, where the relationship between sound

waves and the membrane response is not easy to determine, and requires an in-depth study to obtain this interaction. For this reason, it is necessary to study the parameters that influence in the dynamic response of the membrane, to determine and limit the response as much as possible. Among the parameters to be studied are: the position of the sound source, the geometry and dimensions of the membrane, the points to measure, the frequency range, among others. The study of these parameters is essential to determine the configuration of the dynamic test.

Palabras Clave— membrana, propiedades mecánicas, ensayo no destructivo, modos de vibración.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales en forma de membrana delgada están presentes en multitud de problemas [1–4], y su aplicación en el ámbito de la ingeniería hace necesario conocer sus propiedades mecánicas.

Sin embargo, determinar las propiedades mecánicas de este tipo de materiales no es tan fácil, sus características particulares, (materiales de pequeño espesor y pequeña rigidez), dificultan su caracterización.

Además, los ensayos tradicionales no siempre son la solución para este tipo de materiales, por tratarse la mayoría de ensayos destructivos o por presentar imperfecciones en los resultados obtenidos.

Por este motivo se busca un ensayo no destructivo, basado en la respuesta dinámica de la membrana, para caracterizarla mecánicamente, concretamente, para obtener el módulo de Young, que es uno de los parámetros más importantes para su modelización.

Hay muchos parámetros que influyen en la respuesta de la membrana, y cuyo efecto sobre ésta es necesario estudiar para concretar la configuración del ensayo [5–7]. Conociendo la influencia de estos parámetros, se podría conocer la

* *Autor de contacto:* tlima@uma.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

respuesta dinámica de la membrana, y relacionar esta respuesta con las propiedades mecánicas, en concreto, el módulo de Young.

Entre estos parámetros se podría destacar la posición de la fuente de sonido, la geometría de la membrana, los puntos de medición, el amortiguamiento o el rango de frecuencia a considerar.

En el presente trabajo se estudia la influencia de estos parámetros en la respuesta de la membrana, realizando para ello simulaciones armónicas mediante el programa de elementos finitos ANSYS.

2. ESTUDIO TEÓRICO

Las membranas de estudio van a tener una geometría con forma circular, y se van a considerar empotradas en su borde.

Las frecuencias naturales de vibración de una membrana circular se calculan con la Ec. 1, dada por Timoshenko [8].

$$f = \frac{\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{gD}{\gamma h}} \quad (1)$$

En la Ec. 1, f es la frecuencia natural en rad/s, a es el radio de la membrana, γ es el peso por unidad de volumen, h es el espesor de la misma, g es la aceleración de la gravedad y D es la rigidez a flexión, cuya expresión viene dada en la Ec. 2:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

Es esta ecuación E y ν son el módulo de Young y de Poisson del material, respectivamente.

El parámetro α es una constante cuyo valor cambia para cada modo de vibración a calcular. Fue dado también por el mismo autor [8].

Con las ecuaciones 1 y 2, queda patente que existe una relación entre las frecuencias naturales de la membrana y las propiedades mecánicas del material, en concreto del módulo de Young, que es el principal parámetro que caracteriza al material.

Si se somete a la membrana a un ensayo dinámico controlado, con una geometría conocida, se pueden captar las frecuencias naturales presentes en la misma, y relacionarlas con el módulo de Young del material.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Con el software de elementos finitos ANSYS, se han realizado simulaciones de membranas circulares, donde se ha sometido a una presión sonora mediante una fuente de sonido. En la Figura 1 se observa un esquema del ensayo simulado.

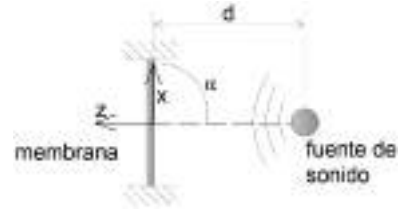


Figura 1. Configuración de los elementos de la simulación.

La fuente de sonido genera una presión sonora, produciendo en la membrana una respuesta dinámica. Se encuentra a una distancia ' d ' del centro de la membrana, y con un ángulo ' α ' entre la fuente de sonido y el plano de la membrana.

En la Figura 2 están representadas las formas modales de los primeros 9 modos de vibración de una membrana circular.

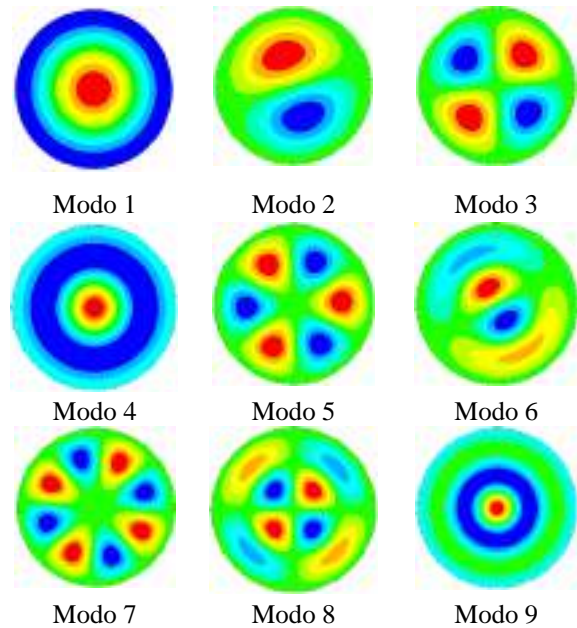


Figura 2. Formas modales para los primeros 9 modos de vibración.

Se han realizado simulaciones numéricas de la respuesta de la membrana para evaluar la influencia de distintos parámetros en la misma. Se han usado distintas geometrías de membranas, con distintos espesores, distintas distancias ' d ' de la fuente de sonido, diferentes ángulos ' α ', distintos puntos de medida, presiones en la fuente y amortiguamientos de la membrana.

3. ANÁLISIS NUMÉRICO

Se han realizado simulaciones armónicas de la membrana usando el software ANSYS.

Las geometrías introducidas en el programa han sido: el elemento sólido (la membrana), y los elementos fluidos simulados mediante una esfera que encierra el aire de

alrededor. Los tipos de elementos usados han sido SOLID185 para el sólido, FLUID30 para el aire dentro de la esfera y FLUID130 para la superficie exterior de la esfera, con la que se simula la superficie como infinita.

Para los tamaños de los tipos de elementos, se ha usado un valor de 3 veces el espesor para la membrana, y para los elementos fluidos, el tamaño mínimo depende del tamaño del elemento sólido, mientras que el máximo depende de la longitud de onda de la frecuencia máxima simulada, y se ha tomado este valor dividido por 10. Con estos valores se consigue que los resultados converjan.

Como el problema presenta simetría, se ha modelado teniendo en cuenta las condiciones de simetría correspondientes en el modelo. De esta forma se consigue un ahorro computacional.

Se han tomado como propiedades mecánicas del sólido las de un material tipo plástico, con densidad de 1200 kg/m^3 , módulo de Young de 2 GPa y coeficiente de Poisson de 0.35.

Se han simulado membranas de 1 cm de diámetro y varios espesores: 40 y 60 μm . En cuanto a la posición y disposición de la fuente, se han tomado distancias 'd' de 1 cm y 5 cm, y ángulos ' α ' de 90° y 45° . Los valores de las presiones en la fuente considerados han sido de 1 Pa y 0.1 Pa. Como coeficientes de amortiguamiento se han tomado los valores de: 1%, 5%, 10% y 20%.

En cuanto al rango de frecuencias simulado ha sido desde 0 Hz a 12 kHz, con incrementos de 50 Hz, que supone un total de 240 frecuencias simuladas.

La Figura 3 representa los distintos volúmenes simulados en el análisis armónico, que son: la membrana, la esfera de aire y la fuente de sonido. Se observa la relación entre los tamaños de elementos de los distintos volúmenes.

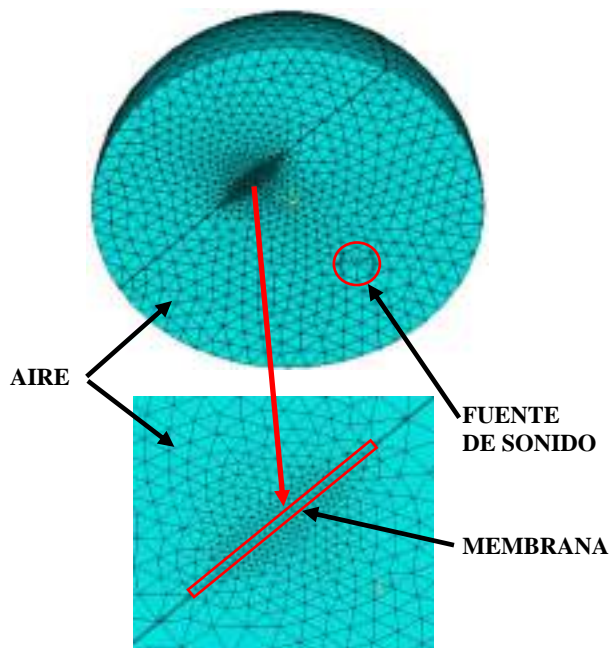


Figura 3. Volúmenes en la simulación.

También se han realizado análisis modales a las distintas geometrías de las membranas para calcular los modos de vibración y las formas modales. Para este análisis se ha usado el tipo de elemento SHELL181, para conseguir una convergencia más rápida, y un tamaño de elemento relacionado con el radio de la membrana, $\text{radio}/160$. Según estudios previos [9], es un tamaño de elemento adecuado para el cálculo.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el análisis modal realizado a las membranas de 40 y 60 μm , las siguientes nueve primeras frecuencias naturales obtenidas están dadas en la Tabla 1:

Tabla 1. Nueve primeros modos de vibración para las membranas de 40 y 60 μm .

Espesor	40 μm	60 μm
Modo 1 (Hz)	1039.2	1555.5
Modo 2 (Hz)	2164.1	3238.2
Modo 3 (Hz)	3557.4	5317.9
Modo 4 (Hz)	4052.2	6061.1
Modo 5 (Hz)	5211.6	7784.7
Modo 6 (Hz)	6200.9	9273.6
Modo 7 (Hz)	7121.8	10632
Modo 8 (Hz)	8640.8	12912
Modo 9 (Hz)	9103.7	13600

En la Figura 4 se han representado las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) en desplazamiento respecto a la presión que se aplica en la fuente de sonido, para el centro de las membranas de 40 y 60 μm de espesor, respecto a la frecuencia, con una distancia 'd' de 1 cm, un ángulo ' α ' de 90° , una presión de la fuente de 1 Pa y un amortiguamiento del 1%.

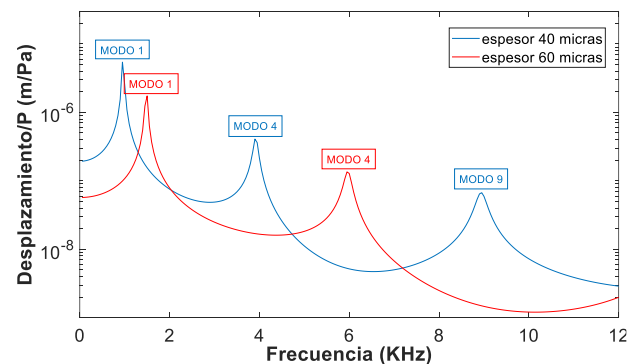


Figura 4. Desplazamiento del centro de la membrana de 40 μm (azul) y 60 μm (rojo) de espesor, $d=1 \text{ cm}$, $\alpha=90^\circ$, presión en la fuente de 1 Pa y amortiguamiento del 1%.

En esta figura se observa que aparecen en las respuestas de las membranas las frecuencias naturales 1, 4 y 9, que son las que presentan simetría axial.

También se han graficado en la Figura 5 las FRF en desplazamiento del centro de la membrana de 40 μm , una presión en la fuente de 1 Pa, un amortiguamiento del 1%, con la fuente de sonido a una distancia de 5 cm, y con ángulos de 90° y 45°. En la figura se observa que los modos presentes son los de simetría axial.

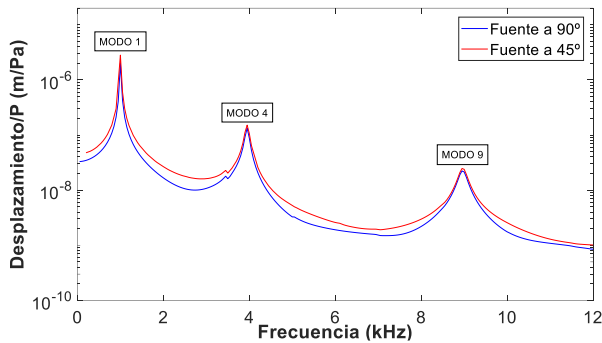


Figura 5. Desplazamiento del centro de la membrana de 40 μm de espesor, $d=5$ cm, presión en la fuente de 1 Pa, amortiguamiento del 1% y ángulos $\alpha=90^\circ$ (azul) y $\alpha=45^\circ$ (rojo).

En la Figura 6 se han graficado los mismos casos que para la Figura 5, pero en vez del centro de la membrana se ha tomado el punto de coordenadas $y=0$ y $x=\text{radio}/2$.

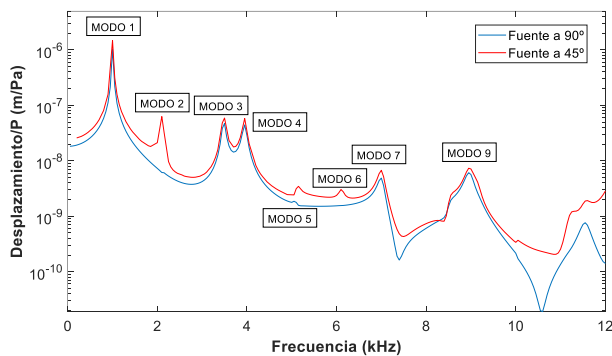


Figura 6. Desplazamiento del punto de coordenadas $y=0$, $x=\text{radio}/2$ de la membrana de 40 μm de espesor, $d=5$ cm, presión en la fuente de 1 Pa, amortiguamiento del 1% y ángulos $\alpha=90^\circ$ (azul) y $\alpha=45^\circ$ (rojo).

En la figura anterior se observa que aparecen en la respuesta de la membrana más modos de vibración que en los casos anteriores. Aparecen más para la fuente de sonido a 45°. Se puede concluir que mientras menos simetría en la configuración del ensayo, más modos se pueden localizar.

También se han graficado en la Figura 7 el desplazamiento del centro de la membrana de 60 μm , $d=1$ cm, $\alpha=90^\circ$, amortiguamiento del 1% y presión en la fuente de sonido

de 1 Pa y 0.1 Pa. Como era de esperar, las respuestas son similares, con diferente amplitud.

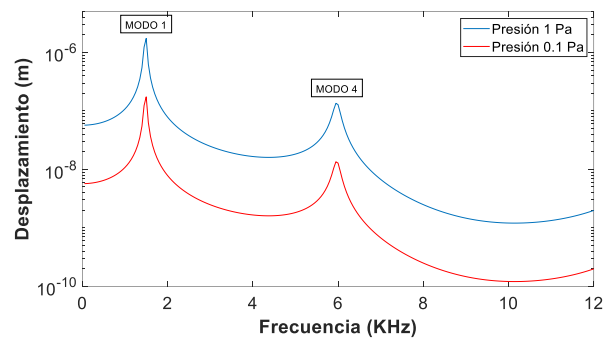


Figura 7. Desplazamiento del centro de la membrana de 60 μm de espesor, $d=1$ cm, $\alpha=90^\circ$, amortiguamiento del 1% y presión en la fuente de sonido de 1 Pa (azul) y 0.1 Pa (rojo).

Por último, se han representado en la Figura 8 la respuesta en desplazamiento de la membrana de 40 μm de espesor, $d=1$ cm, $\alpha=90^\circ$, amortiguamiento del 1% y presión en la fuente de sonido de 1 Pa, para diferentes amortiguamientos en la membrana: 1%, 5%, 10% y 20%.

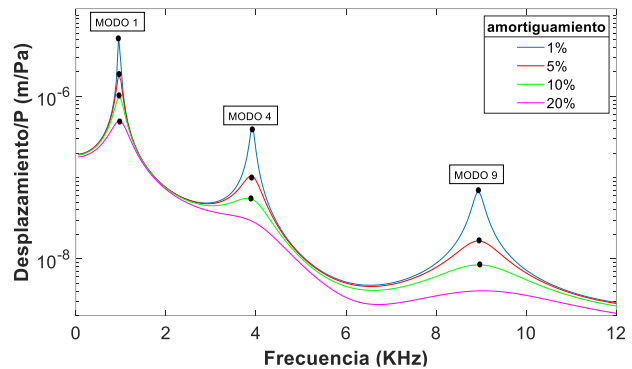


Figura 8. Desplazamiento del centro de la membrana de 40 μm de espesor, $d=1$ cm, $\alpha=90^\circ$, presión en la fuente de sonido de 1 Pa y amortiguamientos: 1% (azul), 5% (rojo), 10% (verde), 20% (magenta).

En esta figura se observa que los picos de la respuesta, que corresponden con los modos de vibración, se suavizan, como era de esperar. Pero otro fenómeno que ocurre, y que a priori no era conocido, es que los picos se desplazan hacia la derecha al aumentar el amortiguamiento.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado un estudio numérico para determinar los distintos parámetros que pueden influir en la respuesta dinámica de una membrana. Los parámetros estudiados han sido la distancia 'd' al centro de la membrana, el ángulo ' α ' entre la fuente y el plano de la misma, la presión

de la fuente de sonido, los puntos de medida y el amortiguamiento de la membrana. En los resultados obtenidos se observa que los modos de vibración presentes en la respuesta son diferentes en función de los parámetros seleccionados.

Es muy importante un estudio previo de los parámetros estudiados (distancia de la fuente de sonido y disposición, presión de la fuente, puntos de medida...) que pueden alterar los resultados obtenidos en el ensayo.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad de Málaga por la financiación recibida.

7. REFERENCIAS

- [1]. Suzuki, H.; Yamaguchi, N.; Izumi, H. Theoretical and experimental studies on the resonance frequencies of a stretched circular plate: Application to Japanese drum diaphragms. *Acoust. Sci. Technol.* **2009**, *30*, 348–354, doi:10.1250/ast.30.348.
- [2]. Lee, J.; Wang, Z.; He, K.; Shan, J.; Feng, P.X.L. High frequency MoS₂ nanomechanical resonators. *ACS Nano* **2013**, *7*, 6086–6091, doi:10.1021/nn4018872.
- [3]. Caminos, L.; Garcia-Manrique, J.; Lima-Rodriguez, A.; Gonzalez-Herrera, A. Analysis of the mechanical properties of the human tympanic membrane and its influence on the dynamic behaviour of the human hearing system. *Appl. Bionics Biomech.* **2018**, *2018*, doi:10.1155/2018/1736957.
- [4]. Kirikae, I. *The Structure and Function of Middle Ear*; Tokio University Press, 1960;
- [5]. Lima-Rodriguez, A.; Gonzalez-Herrera, A.; Garcia-Manrique, J. Study of the dynamic behaviour of circular membranes with low tension. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, doi:10.3390/app9214716.
- [6]. Gonzalez-Herrera, A.; Tao Cheng, J.; Rosowski, J.J. Analysis of the influence of the speaker position on the study of the dynamic behavior of a membrane combining holography technique and finite element models. In Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2015; 2015.
- [7]. Lima-Rodriguez, A.; Garcia-Manrique, J.; Dong, W.; Gonzalez-Herrera, A. A Novel Methodology to Obtain the Mechanical Properties of Membranes by Means of Dynamic Tests. *Membr.* **2022**, *12*.
- [8]. Timoshenko, S. *Vibration problems in engineering*; New York, 1928;
- [9]. Gonzalez-Herrera, A.; Olson, E.S. A study of sound transmission in an abstract middle ear using physical and finite element models. *J. Acoust. Soc. Am.* **2015**, *138*, 2972–2985, doi:10.1121/1.4934515.



VISUALIZACIÓN DE VIBRACIONES SIN CONTACTO MEDIANTE CÁMARAS DE ALTA VELOCIDAD

Pablo Alloza Frutos^{1*}
Sergio Anda Pérez²

¹Technical Director, TRACK-NOISE

²Technical & Sales Manager, VIBLENS – Ingeniería del Silencio

RESUMEN

Esta publicación presenta un caso de estudio y aplicación de tecnologías de visualización y análisis de vibraciones con cámaras de alta velocidad y algoritmos optical flow, frente a técnicas tradicionales de medición de vibraciones. La posibilidad de realizar mediciones de vibraciones sin contacto en varios puntos simultáneamente ofrece nuevos puntos de vista y aplicaciones en entornos y situaciones complejas, tanto en el sector industrial como en estructuras civiles. Se ha realizado una campaña de medidas en un entorno controlado con ambos métodos, analizando el alcance de los datos registrados. Tras su análisis y comparación, se presentan los resultados obtenidos, evaluando la precisión, la eficiencia y las ventajas y desventajas de cada tecnología.

ABSTRACT

This publication presents a case study and application of vibration visualization and analysis technologies using high-speed cameras and optical flow algorithms compared to traditional vibration measurement techniques. The ability to perform non-contact vibration measurements at multiple points simultaneously offers new perspectives and applications in complex environments and situations, both in the industrial sector and civil structures. A measurement campaign has been conducted in a controlled environment using both methods, analyzing the scope of the recorded data. Following their analysis and comparison, the obtained results are presented, evaluating the accuracy, efficiency, and advantages and disadvantages of each technology.

Palabras Clave— visualización, vibraciones, video.

1. INTRODUCCIÓN

El control de la transmisión de vibraciones es fundamental en maquinaria de industria, oficinas, edificios residenciales, etc. Cuando se detecta un problema, por necesidades normativas, de análisis o de certificación, es necesario realizar mediciones. Existen numerosos equipos y tecnologías disponibles; los métodos más clásicos consisten en un vibrómetro y uno o varios acelerómetros que puede tener la capacidad de medir entre 1 y 3 ejes cada uno. Las nuevas tecnologías en el mercado permiten realizar un análisis ODS (*Operating Deflection Shape*) basado en videos registrados con cámaras de alta velocidad. De esta forma se optimiza el tiempo y esfuerzo en la adquisición de datos, sobre todo en escenarios donde se requiere instrumentar muchos sensores, ya que el único hardware necesario es un cámara de video.

ODS (formas de deflexión operacional, traducido al castellano) es un método de análisis para visualizar el comportamiento de patrones de vibración de máquinas, objetos y estructuras bajo diferentes condiciones de uso. Es necesario realizar mediciones de vibración en varios puntos referenciados con la geometría del objeto evaluado. Los resultados obtenidos se muestran como modelos animados de la geometría del objeto bajo estudio, relacionados con cada modo de vibración calculado.

Con los métodos tradicionales se utilizan sensores de vibración, acelerómetros o vibrómetros láser; con esta nueva tecnología, cada pixel definido en el video (en función de su resolución) es evaluado, proporcionando datos de muchos puntos en una sola adquisición. Usando sensores de vibración, el número de puntos de medida es limitado y el tiempo y coste de instrumentación puede ser muy considerable, además de la necesidad de construir o definir la geometría. Los vibrómetros láser tienen la ventaja de ser una tecnología sin contacto, así que no añaden peso al objeto, y pueden generar la geometría directamente; pero el tiempo de

* **Autor de contacto:** alloza@track-noise.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

instalación y procesado también puede ser alto, además de ser instrumentación generalmente muy cara.

Con esta nueva tecnología para medir vibraciones, que utiliza algoritmos Optical Flow HR, se reduce considerablemente el tiempo de instrumentación y adquisición de datos, además de proporcionar un gran número de canales virtuales. La lente y el zoom de la cámara de alta velocidad definen el tamaño de pixel y por tanto la resolución espacial del desplazamiento. Por otro lado, la tasa de muestreo define la frecuencia máxima que se puede analizar, según el teorema de Nyquist, es necesario el doble de frecuencia de muestreo (fps) que la frecuencia máxima a evaluar. Los resultados se pueden analizar, al igual que con las tecnologías tradicionales, en el dominio temporal y en el dominio frecuencial.

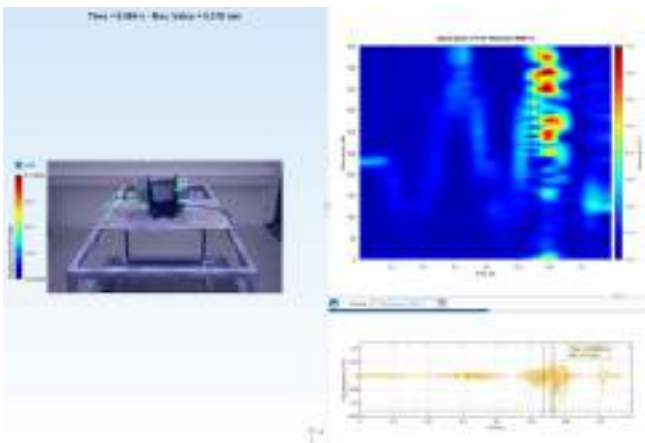


Figura 1. Ejemplo de análisis ODS con WaveCam en el dominio temporal: Motor eléctrico sobre soporte metálico. [4]

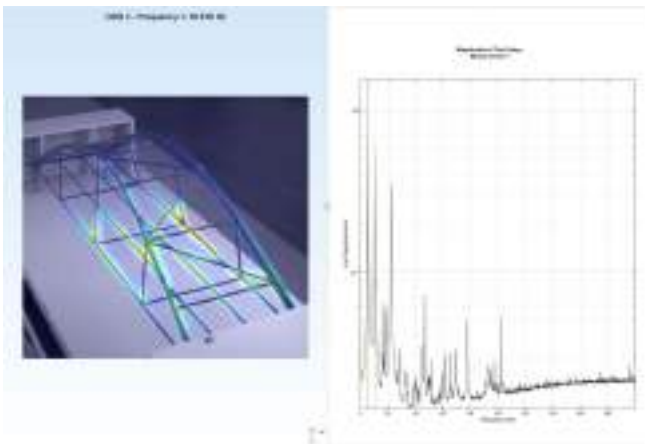


Figura 2. Ejemplo de análisis ODS con WaveCam en el dominio frecuencial: Maqueta de puente, resultado a 10.5 Hz. [4]

2. CASO DE ESTUDIO

2.1 Antecedentes

Se ha realizado una campaña de medidas utilizando diferentes técnicas de evaluación de vibraciones para compararlas entre sí. El objetivo fue evaluar unas unidades de climatización que tenían colocados amortiguadores nivelables de goma que parecían haberse degradado con el paso del tiempo y por estar a la intemperie. La máquina estaba en contacto con una carcasa protectora y las tuberías de aire y toda la instalación de tubos estaba en contacto rígido con el suelo/ Las bombas estaban ancladas rígidamente a la bancada, y ésta al suelo. El trazado de las tuberías del grupo de presión estaba desunido a las paredes mediante láminas de caucho.

A continuación, se muestra una vista general de la situación de la unidad exterior de climatización y de la instrumentación utilizada.



Figura 3. Vista general de unidad exterior de la máquina de aire acondicionado.



Figura 4. Instrumentación utilizada, cámara de alta velocidad y vibrómetro.

2.2 Cuadro resumen de puntos medidos

Lugar	Posición HSS	Medida HSS	Descripción	Med. SV
Azotea	1	2	Clima- pata 1 - Z	525
Azotea	2	3	Clima - pata 1 - Z	527
Azotea	2	3	Clima - pata 1 - Z	529
Azotea	3	4	Clima - pata 2 - Z	532
Azotea	3	4	Clima - pata 1 - X	533
Azotea	3	4	Clima - pata 1 - Y	534

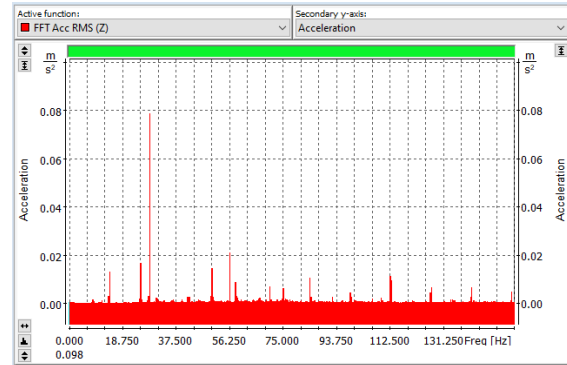


Figura 3. FFT SV527 (Pata 1Z).

2.3 Resultados mediciones

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones realizadas con acelerómetro en un cuadro resumen:

Med. SV	Pico 1 [Hz // m/s ²]	Pico 2 [Hz // m/s ²]	Pico 3 [Hz // m/s ²]	Pico 4 [Hz // m/s ²]
525	16.11 // 0.024	32.23 // 0.127	64.94 // 0.0004	75 // 0.0001
527	14.06 // 0.013	25.59 // 0.001	28.22//0.079	50.4 // 0.001
529	14.06 // 0.014	25.10 // 0.011	28.22 // 0.039	56.45 // 0.024
532	14.06 // 0.015	25.20 // 0.008	28.22 / 0.039	56.44 // 0.013
533	14.06 // 0.026	28.22 // 0.094	56.44 // 0.12	84.67 // 0.043

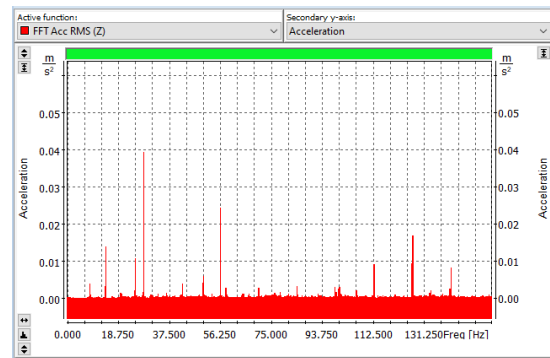


Figura 4. FFT SV529 (Pata 1Z).

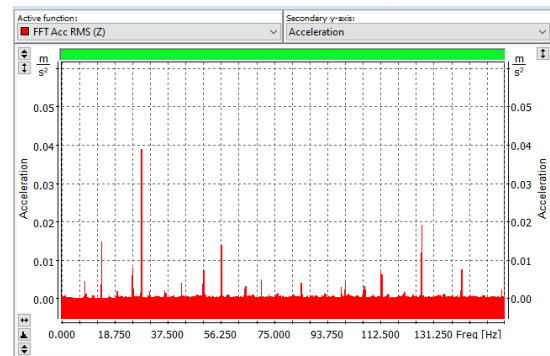


Figura 5. FFT SV532 (Pata 2Z).

Y los gráficos (FFT)

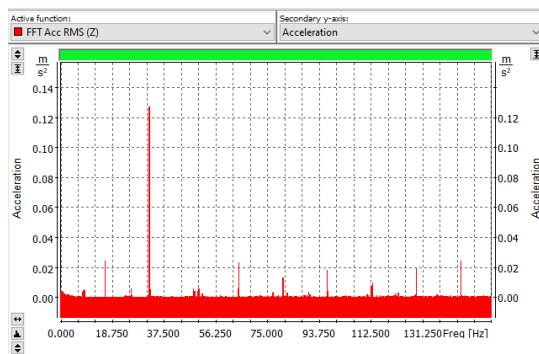


Figura 2. FFT SV525 (Pata 1Z).

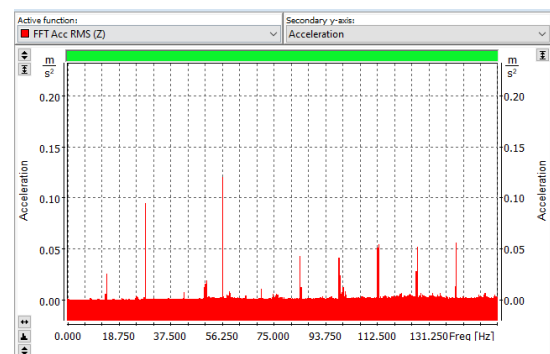


Figura 6. FFT SV533 (Pata 1X).

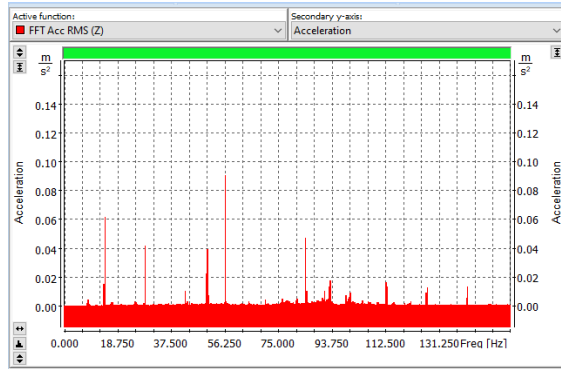


Figura 7. FFT SV534 (Pata 1Y).

A continuación se muestra el análisis mediante la herramienta WaveCam, centrandolo en el soporte de la climatizadora (punto verde).

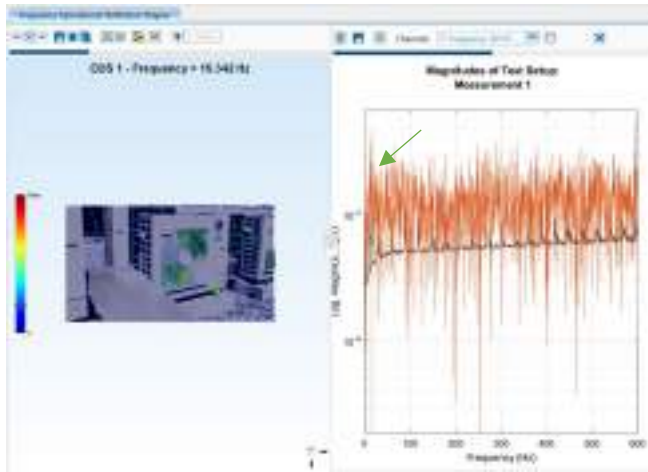


Figura 8. Resultado de análisis (Pata 1Z)

3. ECUACIONES UTILIZADAS

Razón de excitación (β):

$$\beta = f/f_0 \quad (1)$$

Atenuación antivibratoria (A) [%]:

$$A [\%] = 100 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 - 1} \right) \quad (2)$$

4. EQUIPAMIENTO UTILIZADO

4.1 Medición tradicional de vibraciones

- Analizador de vibraciones marca Svantek, modelo SVAN954.
- Acelerómetro marca Svantek, modelo SV80.
- Cableado de conexión y base magnética

4.2 Medición con cámara de alta velocidad

- Software de visualización de vibraciones: WaveCam de gfai tech.
- Cámara de alta velocidad: Chronos 2.1 de Kron Technologies.

5. CONCLUSIONES

En esta publicación se ha evaluado un nuevo método de análisis ODS basado en video (WaveCam), comparándolo con otras tecnologías conocidas de análisis de vibraciones, en una campaña de mediciones sobre instalaciones industriales en un edificio residencial.

La herramienta WaveCam muestra resultados válidos comparándolos con métodos clásicos, como la evaluación mediante acelerómetros. Las mediciones y el procesamiento de datos son simples y rápidas, proporcionando una gran cantidad de resultados, ya que varios puntos de evaluación son calculados al mismo tiempo. Hay que tener en cuenta la influencia de las condiciones de luminosidad y de posibles superficies reflectantes, además de la necesidad de elegir varios puntos de evaluación adecuados.

A partir de los resultados obtenidos con ambas tecnologías, se pueden proponer soluciones de mejora y mitigación de vibraciones. Aunque la mayor energía se midió en frecuencias cercanas a 28 Hz, el primer pico se ha detectado alrededor de los 14 Hz, por lo que se propone sustituir los amortiguadores actuales por muelles metálicos de $3 < f_0 < 5$ Hz con lo que se logrará una atenuación $> 80\%$

Al colocar amortiguadores, se deben eliminar todos los contactos sólidos con cualquier estructura adyacente.

6. REFERENCIAS

- [1] Cyril M. Harris, "Manual de medidas acústicas y control del ruido", McGraw-Hill, Aravaca, 1995.
- [2] Bogatkov, Herfert, Gollnick. Rotational Operating Deflection Shapes Analysis with High Speed Camera. IMAC 2023, Austin, USA



[3] B. Schwarz, M.H. Richardson, “Introduction to Operating Deflection Shapes” CSI Reliability Week, Orlando, FL, October 1999.

[4] Vorrhein, Höna, “Vibration analysis base on video data for buildings and structures” Internoise 2023 Chiba, Japan.

[5] WaveCam Video vibration software.
<https://www.gfatech.com/products/structural-dynamics/vibration-analysis-with-wavecam> last accessed 2023-09-15



POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF VIBRATION REDUCTION AT THE PROPAGATION PATH

Laura Ibanez Rodriguez¹
Michael Österreicher¹

¹ iC group Vienna, Austria

ABSTRACT

Real Estate Developments in the proximity of existing railway lines usually lead to additional demands on the planning and execution of the project. In addition to effects such as electric/electromagnetic fields or noise, vibrations and the resulting structure-borne noise can also represent a cost-relevant aspect during planning and execution. The implementation of track-side measures is especially at existing railway lines not possible. Therefore, measures at the building or at the propagation path (subsoil) must be considered. Measures on the building, such as elastic building bearings, are difficult to implement in complex building structures. In addition, the high insulation effects achieved by elastic building bearings are often not necessary, so that alternative, more cost-effective measures are considered.

In the present study, measures at the propagation path are examined. Diaphragm walls, pile walls are examined based on numerical model calculations. Such civil engineering measures must be sometimes constructed anyway partly for constructional reasons, e.g., for excavation protection. The investigations are carried out based on numerical model calculations with the FLAC software. The aim of the present work is to investigate the effectiveness of different measures in the subsoil in the light of geological boundary conditions.

Keywords— railway vibration, propagation, reduction

1. INTRODUCTION

Developments in the area of individual mobility and the associated need for highly available public transport possibilities lead on the one hand to an accelerated expansion of public transport and on the other hand to the fact that real estate developments are oriented towards public transport. For this purpose, areas in the vicinity of railroad lines, in particular railroad stations, are released for development. However, this proximity to public transport, in particular to railway lines, also entails disadvantages with regard to possible immissions from vibrations or re-radiated noise. In addition, the constructional boundary conditions, such as noise protection windows, lead to the fact that the base noise levels in the living

rooms are low and externally immitted immissions, especially re-radiated noise, come more to the fore.

Measures to reduce vibration and secondary noise emissions are conceivable at emission side (track side), at propagation path or at the building itself. In the case of newly constructed lines, the most efficient method of reducing emissions is to use appropriate measures (under-ballast mats, under-sleeper pads or mass-spring systems). In case of new residential buildings in vicinity of existing railway lines, it is possible to consider measures at the building itself. These can consist in the reinforcement of individual components (e.g., foundation slab) but also in the partial or complete elastic bearing below the foundation.

In special situations, however, e.g., when existing objects along the railroad are to be renovated or upgraded, it may not be possible to take measures on either the existing building or the railway line. In such cases, it is possible to consider measures at the propagation path.

The present work examines the possibilities and limits of this measure based on numerical simulations. The aim is to define boundary conditions for the modelling and to describe the possible vibration reduction.

2. PRINCIPLES

The rolling load over the rails generates alternating force effects which propagate over the superstructure and substructure into the subsoil as vibrations.

In the ideal half-space, two major types of waves are generated by an excitation at the surface - as shown in figure 1 [1]. They are (a) body waves, which propagate hemispherical into the depth and (b) surface waves, which - like water waves - propagate on the surface (with limited depth effect). The first category consists of compression and shear waves, to the second belong mainly the Rayleigh waves.

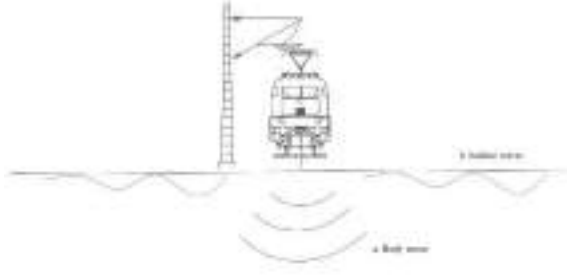


Figure 1: Major types of waves

An analytical calculation of the vibration propagation can be performed considering eq. 1 and the two auxiliary variables of eq. 2 and eq. 3.

$$v = v_1 \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-n} \exp[-\alpha(R - R_1)] \quad (1)$$

$$R_1 \approx \frac{a}{2} + \lambda_R \quad (2)$$

$$\alpha \approx \frac{2\pi D}{\lambda} \quad (3)$$

Where v or v_1 is the vibration velocity at the distance R or the reference distance R_1 , D is the material damping, and λ is the wavelength of the relevant waveform. The exponent n is the parameter which describes the geometric propagation of the corresponding waveform in an ideal half-space. The corresponding values for n , depending on the waveform or the excitation characteristic, can be found in Table 1.

Table 1: Wave propagation in ideal half space

wave type	vibration reduction point source	vibration reduction line source
body wave on surface	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^1$
surface wave	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{0.5}$	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^0$

Body waves of a point source shows the strongest decrease, while surface waves of a line source, related to the purely geometric damping in an ideal half-space, continues unchanged.

3. NUMERICAL CALCULATIONS

3.1. Program package *Flac*

For the numerical investigations, the software package *Flac* from Itasca in version 8.0 was used. *Flac* is a finite difference program for solving static, dynamic and geothermal problems.

Load application/vibration excitation in the model was performed on the surface. A *Sinc* function was chosen therefore with an excitation frequency range of 1-200Hz and a duration of 0.02s. Figure 2 shows a graphical representation of the time history of the *Sinc* function used.

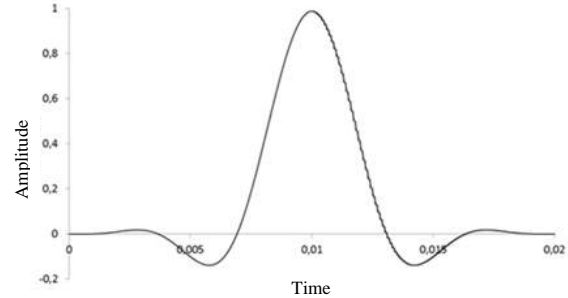


Figure 2: Time course representation of the Sinc impulse.

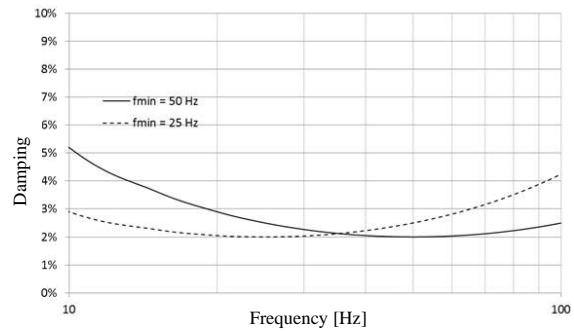


Figure 3: Rayleigh damping f_{\min} from 50Hz to 25Hz.

Rayleigh damping was assumed as the damping approach in the simulations. The parameters for the Rayleigh damping were assumed to be 2% at $f_{\min}=25\text{Hz}$ (ground) and 50Hz (concrete). This means that the previously assumed damping is given at the respective frequency f_{\min} , or the minimum damping occurs in this range (cf. Figure 2).

3.2. Calculation Model

A standard situation of a railway line on surface was chosen as the calculation model (Figure 3). The load introduction in the model was carried out at the surface. A concrete wall was realized in the model at the propagation path. The depth of the concrete wall and the thickness was varied in the simulation calculations.

Since there is no rigid connection between the soil and the concrete wall, an element row (10cm) with a softer layer was assumed in the model (Figure 4 and Table 2).

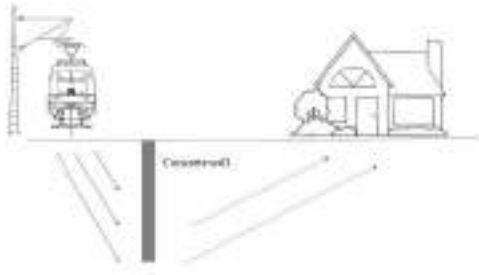


Figure 1: Modelling situation.

The model dimensions themselves are 100m and 60m in depth. The element size was chosen with 10cm, so that frequencies up to 100Hz can be adequately resolved at the given wave velocities in any case. The approach was followed that at least 4-5 elements were given for one wavelength [2]. As geological/geodynamic boundary conditions a homogeneous half-space with the parameters given in table 2 was assumed.

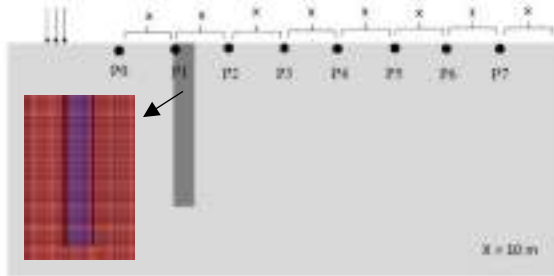


Figure 2: Calculation Model.

In total, the simulation results were collected at 8 calculation points (P0 to P7). At each of these calculation points, the results from 3 different node points were averaged. The calculation points themselves were chosen 2m below the ground surface. This is to reflect the situation of a building foundation.

The dynamic calculation itself takes place over 0.8s. This was chosen in such a way that even the slowest wave, the Rayleigh wave, passed through the model dimensions in any case.

Table 2: Geodynamic parameters of the model

	density	c_p	c_s	K_{dyn}	G_{dyn}
	[kg/m ³]	[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]
half space	1.900	1400	700	248	93
reduced zone	190	140	70	24	9,5
concrete	2500	4200	2500	23200	15630

The evaluation of the calculation data at the individual calculation points (P0 to P7) was carried out with the program package *Octave*. Both the maximum values within the 0.8s calculation time and the one-third octave band spectra for each calculation point were evaluated.

The following situations were simulated with the present work:

- concrete wall thickness of 60cm and 80cm respectively
- concrete wall depths of 5m, 8m, 15m and 20m
- 4 different subsoil parameters

The results and interpretations of the simulations are given in the following sections. The indicated distances of the individual calculation points refer to the source in each case.

3.3. Simulation Result

3.3.1. Influence of the concrete wall thickness

To determine the influence of the thickness of the concrete wall, simulations were carried out with two different thicknesses (60cm and 80cm). These thicknesses were chosen based on the usual design thicknesses of piles and diaphragm walls, respectively.

The results of the comparison show that the differences between the two investigated concrete wall thicknesses are relatively small (12-14%) and occur mainly at frequencies between 30-60Hz. Outside this frequency range, no significant differences between the two investigated variants can be observed.

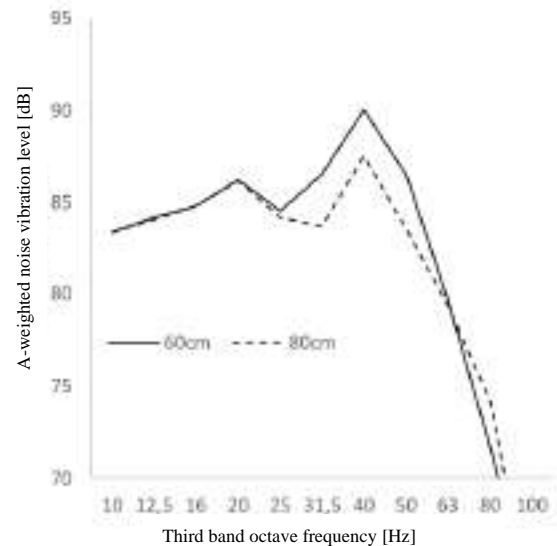


Figure 3: Comparison 60cm vs. 80cm concrete wall.

3.3.2. Influence of the concrete wall depth

Another goal of the present work is to show the influence of the length (depth) of the concrete wall to vibration reduction. In past works [3]-[5] it is pointed out that the depth of concrete walls has a significant influence on the effectiveness in terms of vibration reduction. In addition, [3]-[5] show that vibration reductions of up to 10dB are possible in higher frequencies.

From the field test at [4] it could be concluded that such a measure is only effective if the depth of the concrete wall is greater than the existing Rayleigh wavelength. From this it is already clear that, considering Eq. 4, the effect of this measure depends on the given wave velocities, in particular the Rayleigh wave velocity, and on the frequencies occurring.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

Figure 7 shows an overview of the vibration maxima at different distances from the source both for the model without concrete wall and for the different depths of the concrete wall. The vibration maxima are shown as levels ($v_{ref}=5 \cdot 10^{-8} m/s$). In addition, Fig. 5 shows the A-weighted [6], [7] vibration levels. This gives information about the vibration reduction in the audible range of the vibrations.

The results generally show that all investigated variants lead to a reduction of vibrations compared to the model without concrete wall. Depending on the distance to the source or the depth of the concrete wall, there is a reduction of 5-10dB. Regarding the A-weighted vibration levels which represent the audible part of the vibrations there are improvements of up to 20dB. The results further show that, the depth of the concrete wall has a significant influence on the vibration reduction. Especially regarding the A-weighted vibration levels, the depth shows a direct correlation with the determined A-weighted vibration levels in the entire investigated distance range to the source (fig. 7).

Regarding the unweighted vibration levels, the influence of the depth of the concrete wall increases with increasing distance from the source. In the range of about 30m, no significant differences of the investigated concrete wall depths of 5 and 8 m on the vibration reduction can be detected.

Fig. 8 shows a frequency analysis for 50m distance to the source. According to acoustics one-third octave bands were chosen.

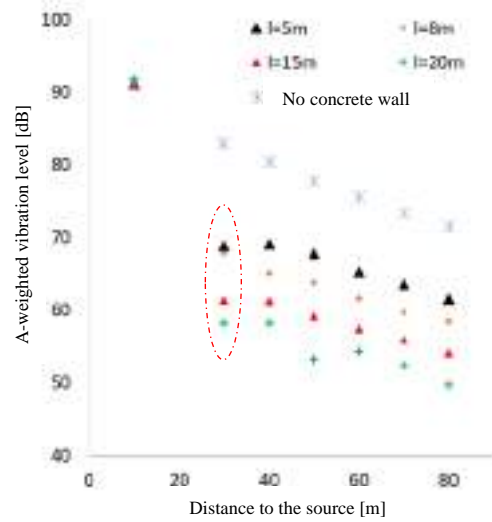


Figure 4: Overview simulation results A-weighted.

The frequency-related results of Fig 8 show that in the very low-frequency range up to about 20Hz only minor differences of the individual concrete wall depths can be observed. This is probably due to the wavelengths of the governing waveforms.

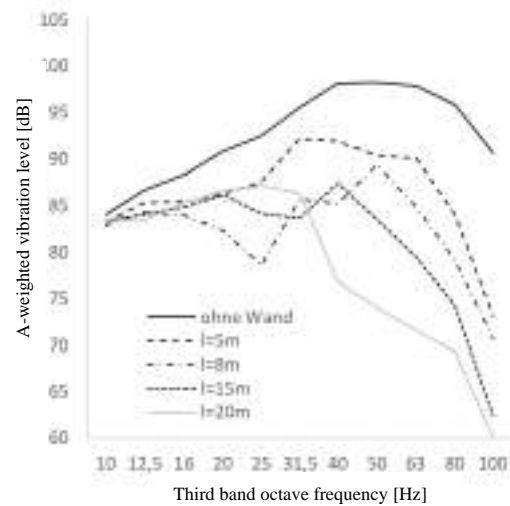


Figure 5: Frequency analyses for the distance of 50m.

According to Eq. 4, the wave velocity of the Rayleigh waves c_R can be estimated from the heavy wave velocity c_S .

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} c_S \quad (5)$$

Based on the knowledge of the wave velocities of the individual wave types, the frequency-dependent wavelengths can be determined according to Eq. 4 (Fig. 9).

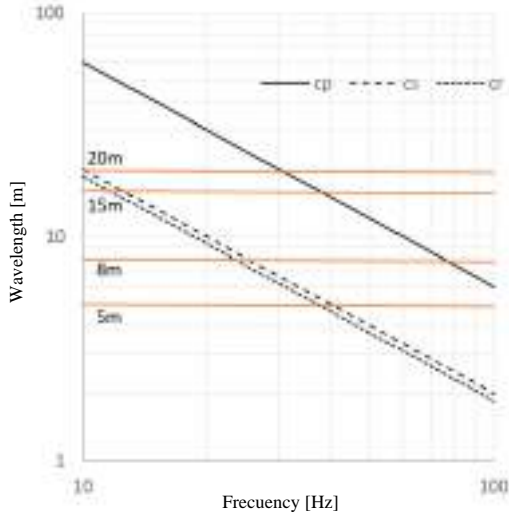


Figure 6: Frequency-dependent wavelengths of individual wave types

It is noted in [4] that the wavelength of the Rayleigh waveform is the decisive parameter for the effectiveness of a concrete wall in the subsurface. This means for the present simulations that already the concrete wall with a depth of 5m reaches the order of magnitude of the wavelength from a frequency of about 30Hz and leads to a significant vibration reduction. This can only be rudimentarily read out from the results in Figure 7. The reason for this is probably to be found in the depth extension of the Rayleigh waves or in the location of the calculation points (2m below ground level). Rayleigh wave amplitudes decrease rapidly with depth, so that at greater depths other waveforms may dominate. Compression waves, for example, have a much higher propagation speed and thus generally longer wavelengths. It can therefore be assumed that the effectiveness, which only begins at higher frequencies than assumed, is due to this circumstance.

Overall, however, the results of Fig. 7 in the higher frequency range show the expected results about increasing vibration reduction with increasing concrete wall depth.

3.3.3. Influence of the subsoil parameters

After examining the influence of the depth and thickness of the concrete wall in the previous sections, this section aims to demonstrate the impact of the substrate parameters on the effectiveness of the concrete wall as a shield.

For this purpose, one of the previously calculated models was chosen. In particular, the calculation model was used in which the concrete wall was 15m deep and with a thickness of 80cm.

To examine the influence four different types of geodynamic subsoil parameters were applied in the model.

Table 3 shows a summary of the parameters used for the present calculations.

Table 3: Geodynamic parameters of the model

	density	c_p	c_s	K_{dyn}	G_{dyn}
	[kg/m ³]	[m/s]	[m/s]	[MPa]	[MPa]
Case A					
half space	1.650	300	110	121	19
Case B					
half space	1.900	1400	700	248	93
Case C					
half space	2000	1800	900	432	162
Case D					
half space	2100	2000	950	587	190

As Table 3 clearly indicates, both very soft substrate parameters, such as those found in a top layer of the subsoil, and very stiff soil parameters were investigated.

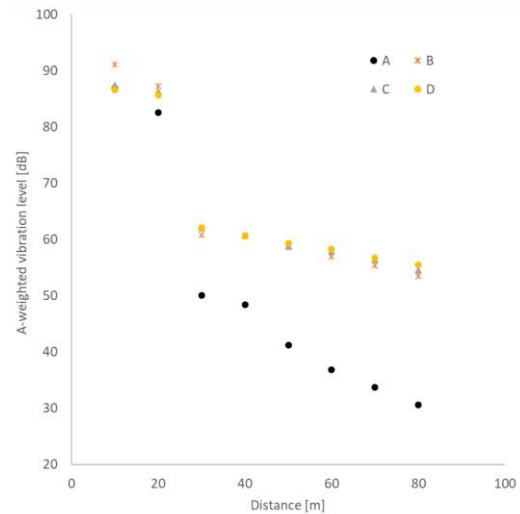


Figure 7: Results overview geodynamic parameters

From the results depicted in Figure 7, it is evident that the very soft layer parameters result in high insulation effects. This is certainly due, on the one hand, to the overall poorer transmission of vibrations through the soft layer, but on the other hand, it is also attributed to the significant stiffness contrast between the soft layer and the concrete wall.

The further examined subsoil parameters show a rather comparable behaviour considering the A-weighted vibration level. Figure 8 shows the frequency spectra of the transfer functions for the observation point at 60m.

In the low frequencies, up to approx. 20Hz the results are comparable. Above 20Hz a significant difference in the transfer function can be observed.

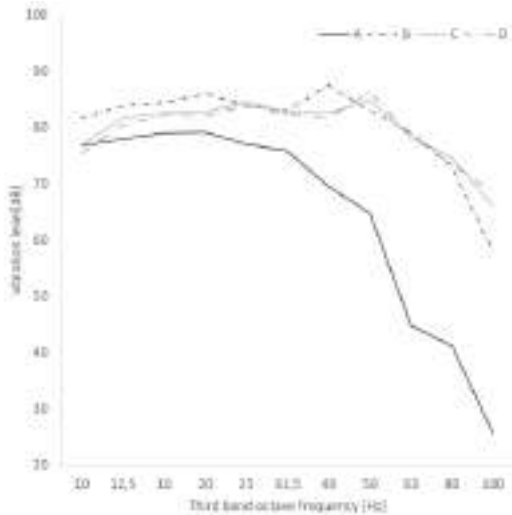


Figure 8: Geodynamic parameters comparison at 60m

The result of the present section shows that, especially for soft soils, there is a significant difference in the vibration damping behavior for the concrete wall.

This effect can primarily be attributed to the higher stiffness contrast between the substrate and the concrete wall. Additionally, there is also the effect that the softer soil layer generally exhibits poorer vibration transmission in the higher-frequency range.

4. SUMMARY AND OUTLOOK

This study gives an overview of the possibilities to reduce vibrations by means of underground wave barriers (e.g., bored pile walls or diaphragm walls). For this purpose, different variants of concrete walls in the subsoil were investigated using a calculation model and evaluated regarding vibration reduction.

In summary, it can be said that significant vibration reduction can be achieved by such measures. In the range of perceptible vibrations, reductions of 5-10 dB can be achieved, depending on the distance to the source and the depth of the measure. In the secondary sound range (A-weighted sum level), improvements of up to 20 dB are possible. However, the simulations also show that the depth of the measure has a considerable influence on the frequency range from which a significant reduction occurs and on the amount of reduction itself.

In any case, the minimum depth for the measure is the length of the wavelength of the relevant wave type (cf. Figure 9). However, this is to be regarded as an absolute lower limit; rather, it must be considered that other wave forms with partly longer wavelengths can be decisive in the subsurface.

In the present study, a homogeneous half-space was used as the basis for the simulation since the aim was merely to show basic relationships and dependencies. In practice, the planning of such measures will be confronted with more complex soil dynamic boundary conditions such as multi-layer structures. A detailed design can therefore only be carried out in individual cases based on the existing soil structures.

Since concrete is an energy-intensive building material, it would be desirable to investigate alternative building materials such as wood or plastic installations or hybrid variants for further studies in this area. In any case, it must be considered that there must be a sufficient difference in stiffness (both positive and negative) between the surrounding soil and the measure itself to achieve significant reductions.

12. REFERENCES

- [1] P. Ziegler, Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr, Herbsttagung der Schweizerischen Gesellschaft für Akust., pp. 1–35, 2012.
- [2] W. Unterberger, B. Hochgatterer, and R. Poisel, Numerical Prediction of Vibrations caused by Rail Traffic in Tunnels W. Unterberger, B. Hochgatterer Geoconsult, Salzburg, Austria R. Poisel Technical University of Vienna, Austria GEOMECHANICS,” doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] A. Dijckmans, A. Ekblad, A. Smekal, G. Degrande, and G. Lombaert, A sheet piling wall as a wave barrier for train-induced vibrations, 4th ECCOMAS Themat. Conf. Comput. Methods Struct. Dyn. Earthq. Eng., no. June, pp. 12–14, 2013, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.02.001.
- [4] A. Dijckmans et al., Mitigation of Railway Induced Ground Vibration by Stiff Wave Barriers, 2016, pp. 2138–2149.
- [5] P. Coulier, S. François, G. Degrande, and G. Lombaert, A numerical study of subgrade stiffening as a mitigation measure for railway induced vibrations through 2.5D and 3D FE-BE models, ECCOMAS Themat. Conf. - COMPDYN 2013 4th Int. Conf. Comput. Methods Struct. Dyn. Earthq. Eng. Proc. - An IACM Spec. Interes. Conf., no. May, pp. 9–10, 2013.
- [6] D. E. J. Lurcock, D. J. Thompson, and O. G. Bewes, Groundborne railway noise and vibration in buildings: Results of a structural and acoustic parametric study, Notes Numer. Fluid Mech. Multidiscip. Des., vol. 139, pp. 193–204, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-73411-8_13.
- [7] G. Müller and M. Möser, Eds., Handbook of Engineering Acoustics. Berlin, München: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.



CLAXON MUDO

Pablo Ebohon Serna

RESUMEN

El Claxon Mudo es un proyecto que aboga por la mejora de la salud de los individuos, contribuyendo a la reducción de la contaminación acústica. Mediante una innovadora tecnología, el Claxon Mudo, disminuiría en gran medida la cantidad de emisiones acústicas producidas por los usuarios de vehículos, proporcionando una alternativa a los cláxones convencionales que tanto contaminan y perjudican la salud de las personas.

ABSTRACT

This Project aims to show a sustainable way of communication between vehicles by the integration of a new concept of horn which principal point is to reduce the amount of noise pollution, caused by vehicle users. Using an advanced technology the “Claxon Mudo” will be able to improve people’s health contributing at noise reduction

Palabras Clave— salud, contaminación acústica, claxon, vehículos, tecnología

1. INTRODUCCIÓN: OBJETIVOS

La contaminación acústica es un problema que atañe a la sociedad actual, causando 12.000 muertes prematuras y 48.000 nuevos casos de cardiopatía isquémica al año solo en Europa, tal y como afirma la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA). La Organización Mundial de la Salud (OMS) se refiere a este problema como uno de los principales factores ambientales que más problemas de salud provoca.

Se conoce como contaminación acústica la presencia de ruidos o vibraciones en el ambiente, que puedan resultar molestos o incluso causar daño o generar riesgo a las personas.

Para establecer una clasificación de estos sonidos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha delimitado los siguiente parámetros:

Cualquier sonido por encima de los 65 decibelios se conoce como ruido, cuando este sobrepasa los 75 decibelios pasa a ser dañino, y doloroso por encima de los 120 decibelios.

Hay gran diversidad de causas y fuentes que pueden contaminar acústicamente: el tráfico aéreo, obras de

construcción, sonidos producidos por animales, restaurantes, ocio; pero el principal motivo de contaminación acústica es el tráfico automovilístico, que será el aspecto que se tratará en este proyecto.

El claxon de los automóviles, según se detalla en el Reglamento General de Vehículos (RGV), “es un aparato reproductor de señales acústicas que emite un sonido continuo, uniforme y de suficiente intensidad”. El claxon es uno de los principales factores implicados en la contaminación acústica relacionada con el tráfico automovilístico, ya que el sonido de un claxon suele rondar los 90 decibelios, medida que supera el límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), aunque organizaciones como el Centro de Experimentación y seguridad Vial de México (CESVI), afirman que el sonido de un claxon puede llegar a los 110 decibelios.

Este proyecto presenta una alternativa a los claxon que hoy en día se conocen y utilizan, y que tan perjudiciales son para la salud. Para combatir todo esto se presenta el Claxon Mudo un utensilio diseñado para reducir en gran medida la cantidad de pitidos que tanto daño causan.

Los objetivos específicos que permiten lograr los objetivos generales son los siguientes:

- ⇒ Diseñar un Claxon Mudo cuyo hardware y software sean fáciles de manejar e integrables en todos los automóviles.
- ⇒ Mejorar de forma progresiva la situación medioambiental y por lo tanto la salud de los individuos.
- ⇒ Conseguir que sea accesible para la mayoría de los conductores.
- ⇒ Conseguir un nivel de ruido inferior en las zonas transitables por vehículos.

2. ANÁLISIS OBJETIVO DEL SONIDO DE UNA BOCINA CONVENCIONAL

Para realizar un análisis objetivo del nivel de presión acústica que pueden recibir los usuarios de la vía al accionar el claxon, se ha utilizado como vehículo emisor el turismo Peugeot 308 del 2009 y al no tener los medios necesarios, como micrófonos calibrados y equipos varios para la recogida de datos, las medidas se han tomado gracias a la aplicación para teléfono móvil Decibel meter - dB, que por diferentes pruebas realizadas ha demostrado ser bastante precisa.

Las medidas se han tomado a 5, 10 y 15 metros del vehículo al aire libre.

Los datos obtenidos son los siguientes:

Medidas tomadas a una distancia de 5 metros del vehículo:

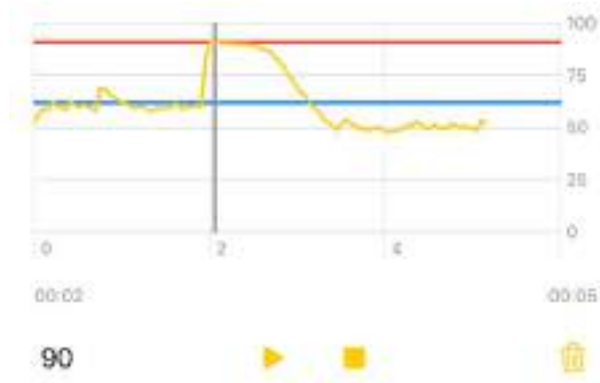


Figura 1. Nivel de presión acústica a 5 metros del vehículo

El nivel de presión acústica de pico ha sido de 90 decibelio

Medidas tomadas a una distancia de 10 metros del vehículo:

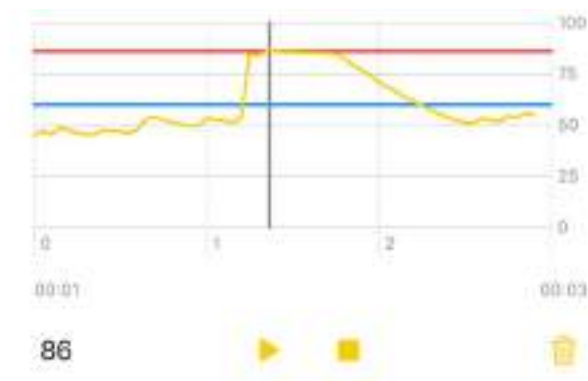


Figura 2. Nivel de presión acústica a 10 metros del vehículo

El nivel de presión acústica de pico ha sido de 86 decibelios.

Medidas tomadas a una distancia de 15 metros del vehículo:

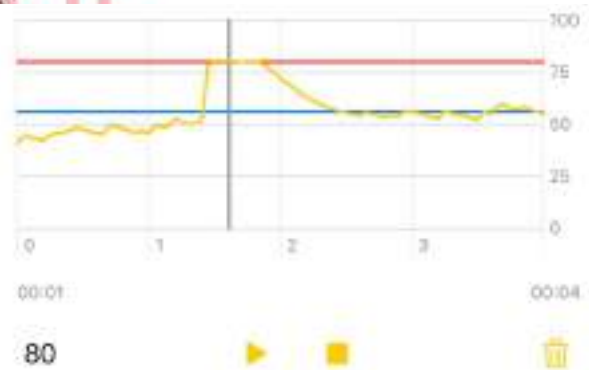


Figura 3. Nivel de presión acústica a 15 metros del vehículo

El nivel de presión acústica de pico ha sido de 80 decibelios.

Observando los datos se puede concluir con certeza que en todos los casos en los que se han tomado las mediciones, el nivel de presión acústica es superior al saludable, según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto del Claxon Mudo, se basa en la idea de que al accionar el claxon de un automóvil (de la misma forma que los actuales), no produzca sonido en el exterior si no en el interior de los vehículos a los que se pretende avisar, esto se lograría mediante el siguiente sistema de funcionamiento:

Cuando el conductor emisor acciona el claxon, los coches situados a una distancia de aproximadamente 300 metros (es el radio aproximado al que se escucha con claridad el claxon de un automóvil) recibirían una señal vía bluetooth (ya que su velocidad de transmisión es muy elevada), esta accionaría en los coches receptores una vibración en el volante seguida de un sonido (con la intensidad necesaria para que no provoque daños en la salud de los integrantes del coche), avisando de esta forma a los coches situados en el rango previamente mencionado. En el caso de que estuviera activa la radio, el reproductor cd o algún dispositivo externo conectado al sistema de sonido del automóvil receptor, dichos dispositivos detendrían la reproducción que estuvieran llevando a cabo para permitir la audición clara de la señal recibida.

Muchas veces los conductores escuchan el sonido de bocinas, pero no saben de dónde proviene, por lo que esto puede retrasar su reacción; por ello el Claxon Mudo cuenta con una interfaz gráfica que permite visualizar la dirección en el eje coordenado en la que se encuentra el vehículo emisor y su distancia, para poder localizarlo a la mayor brevedad posible.

Esta tecnología de localización también permitiría que el sonido se proyectara en el interior del coche receptor por el lado en el que se encuentre el vehículo emisor, favoreciendo así la velocidad de reacción.

Una vez establecido el mecanismo de aviso a los automóviles, faltaría incluir a los peatones, ciclistas y conductores de ciclomotor en esta innovadora tecnología. Al no contar en estos casos con las posibilidades ni la tecnología necesaria, la única vía para poder llamar la atención de estos grupos es de forma acústica, pero esto tendría lugar en ocasiones concretas, como el caso de prevenir de un accidente a peatones, ciclistas o ciclomotores, detectando en un radio de 300 metros si algún integrante de estos colectivos se encuentra en la plataforma de la vía o en situación de inminente peligro.

Para facilitar el recibimiento del aviso por parte de los receptores e incluso de los posibles involucrados que no se encuentren dentro de un radio de 300 metros del emisor, el Claxon Mudo contará con una pequeña luz (perceptible con claridad durante el día y la noche) colocada en la parte superior del vehículo que permitirá a todo individuo poder distinguir la zona afectada por el aviso y así poder prevenir el peligro.

3.1. Detalles de funcionamiento

Para esclarecer el funcionamiento del sistema del Claxon Mudo, se mostrará a continuación como este responde ante diferentes situaciones:

3.1.1. Cuando solo hay automóviles en el rango de incidencia

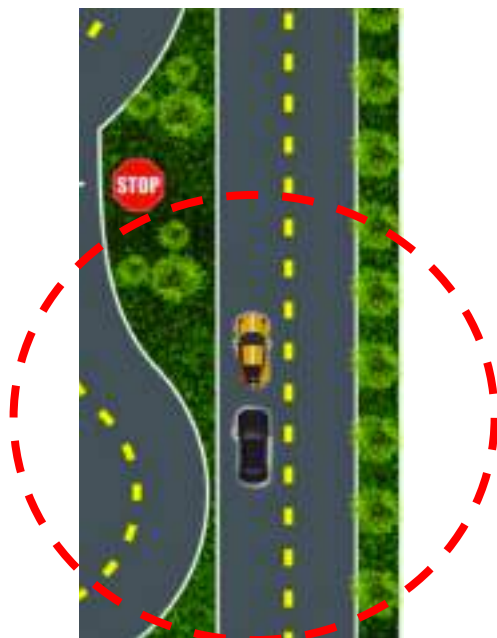


Figura 4. Cuando solo hay automóviles en el rango de incidencia

En el caso mostrado en la figura 1, se toma como vehículo emisor al coche negro y como receptor al del coche naranja. El conductor del coche negro percibe un posible peligro y pretende alertar al del coche naranja accionando el claxon mudo, lo que provocará que en el

interior del coche naranja se escuche un pitido, posterior a una ligera vibración del volante. El sonido reproducido en el interior del coche naranja se ubicará espacialmente en la parte trasera del vehículo, ya que el vehículo emisor se encuentra por detrás del receptor.

En el monitor colocado en el interior del coche naranja aparecerá una flecha indicando la posición en la que se encuentra el vehículo emisor de la alerta y la distancia a la que este se encuentra.

También se encenderá una luz led situada en la parte superior del vehículo naranja, para representar de forma visual el accionamiento del claxon.

3.1.2. Cuando solo hay peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor en el rango de incidencia



Figura 5. Cuando solo hay peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor en el rango de incidencia

El caso mostrado en la figura 2, toma como vehículo emisor a la furgoneta blanca y como receptores a los tres peatones. El conductor de la furgoneta percibe un posible peligro y decide alertar a los peatones accionando el claxon mudo, que en este caso producirá el sonido de una bocina convencional, debido a la imposibilidad de poder alertar a los viandantes de otra manera.

3.1.3. Cuando hay automóviles y peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor en el rango de incidencia



Figura 6. Cuando hay automóviles y peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor en el rango de incidencia

En el caso mostrado en la figura 3, se toma como vehículo emisor a la furgoneta blanca y como receptores a los tres peatones y al turismo negro. El conductor de la furgoneta percibe un posible peligro y decide alertar, accionando el claxon mudo. Al haber peatones en situación de riesgo y vehículos en el rango de incidencia del claxon mudo, el sistema de identificación del claxon priorizará la presencia de peatones y hará sonar la bocina convencional, pero en el interior del turismo también se accionará la vibración del volante y se encenderá la luz superior, para proporcionar un aviso más completo.



Figura 7. Cuando hay automóviles y peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor en el rango de incidencia

En el caso mostrado en la figura 4, se toma como vehículo emisor a la furgoneta blanca y como receptores a los peatones que caminan por la acera y al vehículo negro. El conductor de la furgoneta percibe un posible peligro relacionado con el vehículo negro y decide alertar, accionando el claxon mudo. El sistema de identificación del claxon mudo detectará que los peatones se encuentran fuera de peligro y nada apunta a que vayan a estarlo (gracias a la inteligencia artificial), por lo que se accionará un sonido en el interior del vehículo negro, localizado espacialmente en la parte superior derecha. En el monitor del vehículo negro aparecerá una flecha en dirección al vehículo emisor y la distancia entre ambos.

También se accionará la luz de aviso en la parte superior del vehículo negro.

3.1.4. Cuando el vehículo emisor está parado

Esta alternativa de funcionamiento es necesaria debido a la excesiva utilización del claxon en situaciones innecesarias y en situaciones en las que se prohíbe su utilización, por ejemplo cuando se usa el claxon para meter prisa a otro vehículo cuando el semáforo se ha puesto en verde o para que los peatones aceleren su paso por un cruce peatonal. En estos casos, al accionar el Claxon Mudo no se produciría el sonido de bocina convencional, solo se produciría la vibración del volante en los vehículos receptores, la señalización en el monitor y la señal lumínica, disminuyendo en gran medida la cantidad de sonidos que hoy en día se producen por estos motivos.

El vehículo emisor solo emitiría el sonido de bocina convencional en el caso de que el sistema de inteligencia artificial detectara algún riesgo en el que se vieran involucrados peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor. Si no hay ningún peligro para los integrantes de alguno de los colectivos anteriormente mencionados, pero sí para otro automóvil, y el vehículo emisor se encuentra detenido, el sistema funcionará al igual que en el caso de que solo haya automóviles en el rango de incidencia, aunque en este también se encuentren peatones, ciclistas o conductores de ciclomotor.

3.2. Viabilidades

Viabilidad tecnológica:

El mayor reto del Claxon Mudo es lograr la tecnología necesaria para localizar con exactitud al vehículo emisor y establecer la diferencia entre automóviles, peatones, ciclistas y ciclomotores para que el sistema reaccione de una forma u otra. Pero la mayor dificultad está en la actuación del sistema del Claxon Mudo ante los peatones, ya que estos en su mayoría caminan por la acera de forma habitual, sin suponer una alteración para la seguridad vial, por lo que el sistema debe diferenciar si el peatón camina con normalidad por la acera o si va a hacer una intrusión por una zona indebida de la carretera (arriesgando su integridad), ya que en este último caso el claxon si emitiría sonido para advertirle, pero no en el caso mencionado anteriormente. Esto podría lograrse mediante una refinada inteligencia artificial.

Viabilidad económica:

El claxon mudo hace uso de varios componentes que ya están incorporados en la mayoría de vehículos, como pueden ser, el claxon convencional, el sistema de sonido o el monitor, por ello el coste de producción no sería muy elevado. Los elementos en los que habrá que invertir la mayor parte del capital serán, el desarrollo del software, la interfaz gráfica y el conexionado para la integración en los vehículos. Al ser un producto con un fin beneficioso para toda la ciudadanía, es lógico pensar que se podría contar con apoyo económico del Sector Público y de empresas automovilísticas que quieran conseguir mayor seguridad en sus vehículos.

3.3. Diseño

A continuación se muestra un ejemplo de diseño que podría presentar la interfaz gráfica del claxon mudo:



Figura 8. Interfaz gráfica



Figura 9. Interfaz gráfica cuando recibe un aviso

La figura 5 muestra el aspecto que tendría la interfaz gráfica cuando no se ha recibido ninguna alerta, y en la figura 6 se observa un supuesto en el que el vehículo rojo hubiera accionado el claxon mudo. La interfaz de la aplicación toma colores más llamativos (rojo) y aparece una flecha indicando la posición del vehículo emisor del aviso y la distancia a la que se encuentra en la parte superior de la pantalla.

Para que la identificación por parte del receptor sea más rápida, aparecerá en la pantalla un vehículo del color y las características del vehículo emisor.

3.4 Diagrama de Bloques

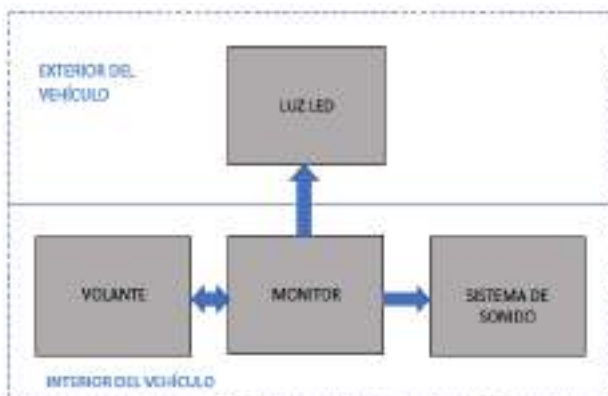


Figura 10. Diagrama de bloques

4. ANTECEDENTES Y MARCO TECNOLÓGICO

Para combatir el aumento y la proliferación de la contaminación acústica, existen leyes en España como la Ley 37/2003 del 17 de Noviembre, del Ruido, desarrollada por el Real Decreto 1367/2007. Estas normas tienen por objeto la regulación de la contaminación acústica para evitar y, en su caso, reducir los daños que puedan producir en la salud humana, los bienes o el medio ambiente. En esta ley se contemplan aspectos sobre el tema que nos ocupa, que anteriormente no se habían tenido en cuenta. Sirva de ejemplo lo siguiente:

“La inmisión sonora presente en el hábitat humano o en la naturaleza, no ha sido tradicionalmente objeto de atención preferente en la normativa protectora del medio ambiente”.

La ley supuso un importante avance en la mejora de la situación medio ambiental, y en esa dirección pretende remar este proyecto, por la desatención que durante muchos años ha tenido el problema de la contaminación acústica, trayendo consigo un retraso en este ámbito.

Para hacer realidad este proyecto, en primer lugar se deberá elaborar el diseño de los elementos hardware involucrados. El Claxon Mudo hará uso de elementos ya integrados en el coche como la bocina convencional o el sistema de sonido, solo habrá que integrar un monitor (en caso de que el automóvil no cuente ya con uno) y una luz de aviso, aparte del conexionado necesario para conectar el Claxon Mudo al vehículo.

El diseño de estos elementos hardware será sencillo, ya que en este ámbito no se presenta ninguna innovación, así que se tomarán como referencia monitores de empresas punteras que fabrican equipos para vehículos como Asus, Misterradio-GPS o PolarLander, que son algunas de las más reconocidas en este sector.

La luz de aviso será una luz led con la suficiente potencia como para que sea perceptible tanto de día como de noche.

Aparte del diseño hardware, otro de los puntos importantes a la hora de desarrollar el proyecto, es la tecnología que se encarga de detectar a los conductores y peatones en un radio concreto y la transmisión de la información que el radar recoja para definir el funcionamiento que debe tener el sistema.

En el mercado hay productos cuyas funcionalidades pueden relacionarse con algunas de las necesarias para realizar este proyecto. Aplicaciones como Waze Navigation o Maps, que cuentan con un geolocalizador y suponen una gran ayuda para el conductor, también radares de distancia como el SH-1098, que es un navegador marino, que localiza los obstáculos y barcos próximos. Por último se utilizaría una inteligencia artificial para recoger los comportamientos de los usuarios de las vías y así poder optimizar el sistema.

Unificando estas tecnologías en una aplicación concebida exclusivamente para el Claxon Mudo se podría obtener el producto deseado.

5. JUSTIFICACIÓN Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO

El proyecto es fácilmente justificable ya que aboga por el bienestar, contribuyendo a la mejora de la salud y del medioambiente.

El apoyo por parte de las instituciones Españolas y de las Europeas sería de sencilla obtención ya que todas ellas se manifiestan a favor de la reducción del ruido producido por los automóviles. A este respecto, en el ámbito español podemos destacar el artículo 12 de la citada Ley del Ruido, titulado Valores límite de inmisión y emisión: “1.Los valores límite de emisión de los diferentes emisores acústicos, así como los valores límite de inmisión, serán determinados por el Gobierno.

Cuando, como consecuencia de importantes cambios en las mejoras técnicas disponibles, resulte posible reducir los valores límite sin que ello entrañe costes excesivos., el Gobierno procederá a tal reducción”

En el apartado 2 de dicho artículo se incluye como emisores acústicos, entre otros, a los automóviles.

Organismos como la Dirección General de Tráfico (DGT) establece que el claxon solo puede utilizarse antes de adelantar a un vehículo de dos ruedas en un paso a nivel o cerca de éste, cuando se trate de evitar un accidente y en vías estrechas o con muchas curvas, o en el caso de un servicio de emergencia, para advertir al restos de vehículos de su presencia. En el resto de situaciones está terminantemente prohibida su utilización, pudiendo multar al conductor que utilice el claxon indebidamente.

Aunque la Dirección General de Tráfico haya delimitado la utilización del claxon, en el día a día se puede percibir la cantidad desmesurada de veces que se escuchan los sonidos producidos por estos aparatos, por lo que la incorporación del Claxon Mudo a los automóviles podría suponer un importante cambio.

También hay iniciativas internacionales, un ejemplo es la Agenda 2030, de gran interés para la UE y las Naciones Unidas. Esta Agenda 2030, aprobada por la ONU en 2015, que incluye los objetivos de desarrollo sostenible, la agenda de financiación global del desarrollo y el acuerdo de cambio climático de Paris, todo esto orientado a la preservación del medioambiente. Se destacan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ya que es el punto de la agenda 2030 que presenta mayor relación con el proyecto del Claxon Mudo. Son 17 los objetivos de desarrollo sostenible y en relación a lo que este proyecto abarca se tendrá en cuenta el 15, “Vida de ecosistemas”.



Figura 11. ODS de vida de ecosistemas de la Agenda 2030

Por los motivos anteriormente mencionados y la preocupación creciente de la sociedad y las instituciones gubernamentales, es seguro que el proyecto contará con más ayudas que limitaciones, ya que puede suponer un gran avance en un sector poco evolucionado como es el de la lucha contra la contaminación ambiental producida por los automóviles.

6. REFERENCIAS

- Autofácil. (20 de Noviembre de 2021). *Autofácil*. Obtenido de Autofácil: <https://www.autofacil.es/trafico/dgt-aclara-uso-claxon/291245.html>
- BOE. (17 de Noviembre de 2003). *BOE*. Obtenido de BOE: <https://www.boe.es/eli/es/l/2003/11/17/37>
- El PAIS. (24 de Enero de 2019). *El Pais*. Obtenido de El Pais: https://elpais.com/elpais/2019/01/14/seres_urbanos/1547477803_448315.html
- IBERDROLA. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/ques-contaminacion-acustica-causas-efectos-soluciones>
- MINISTERIO DE DERECHOS SOCIALES Y AGENDA 2030. (s.f.). *Ministerio de derechos sociales y agenda 2030*. Obtenido de Ministerio de derechos sociales y agenda 2030: <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. (2 de Marzo de 2022). *OMS*. Obtenido de OMS: <https://www.who.int/es/news/item/02-03-2022-who-releases-new-standard-to-tackle-rising-threat-of-hearing-loss>
- UNIVERSEDAD DE PIURA. (23 de Julio de 2014). *Universidad de Piura*. Obtenido de El abuso del claxon: <https://www.udep.edu.pe/hoy/2014/07/el-abuso-del-claxon/>



DIVIÉRTETE Y APRENDE A ESCAPAR DEL RUIDO

*Lena Benito-Sendin Plaar
Lara del Val Puente¹ y Ana Isabel Tarrero Fernández²*

¹Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática. ETSI Telecomunicación.
Universidad de Valladolid

²Dpto. Física Aplicada. EI Industriales. Universidad de Valladolid

RESUMEN

Escapa del ruido es una actividad de gamificación diseñada para sensibilizar, desde edades tempranas, sobre los problemas que origina el ruido y los efectos que produce. Consta de un Escape Room virtual, un cartel para su difusión, un marcapáginas para poder recordar lo aprendido con el juego y un manual con las soluciones para el promotor de la actividad. La actividad permite aprender de forma lúdica y divertida conceptos fundamentales relacionados con el ruido y cómo protegerse del mismo, con el fin de disminuir sus efectos nocivos tanto en las personas como en el medio ambiente.

Palabras Clave - Concienciación, acústica, ruido, efectos del ruido, Escape-Room,

ABSTRACT

Escape from noise is a gamification activity designed to raise awareness, from an early age, about the problems caused by noise and the effects it produces. It consists of a virtual Escape Room, a poster for dissemination, a bookmark that facilitates to remember what has been learned with the game and a manual with the solutions for the promoter of the activity. The activity allows to learn in a playful and fun way fundamental concepts related to noise and how to protect oneself from it, to reduce its harmful effects on both people and the environment.

Keywords – Awareness, Acoustics, Noise, Noise effects, Escape-Room,

1. INTRODUCCIÓN

Para el año 2050 la OMS [1] estima que una de cada cuatro personas va a tener algún tipo de problema auditivo. Por tanto, se considera necesario y urgente tomar medidas para evitarlo o al menos para reducirlo. El Escape Room es uno de los muchos métodos didácticos alternativos empleados en la actualidad. Consiste en una propuesta de gamificación para el aprendizaje, que utiliza mecánicas y elementos

característicos de los juegos y tiene numerosas ventajas como la motivación, el compromiso, el espíritu competitivo... [2,3]. Teniendo en cuenta todo lo anterior, y una propuesta recibida desde la Sociedad Española de Acústica, se decidió ofertar el desarrollo un Escape Room Virtual como Trabajo de Fin de Grado, en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, que finalmente ha sido desarrollado por la alumna Lena Benito-Sendin Plaar, bajo la dirección de las profesoras Ana Isabel Tarrero Fernández y Lara del Val Puente.

El objetivo de este trabajo consiste en el diseño y creación de un Escape Room virtual para concienciar a las personas, y sobre todo a la gente joven, sobre los problemas que puede ocasionar el ruido. Con la aplicación de estrategias didácticas y dinámicas lúdicas se pretende que los usuarios adquieran conocimientos acerca del ruido y su repercusión sobre la salud y el medio ambiente [4-7], y adopten conductas adecuadas para reducirlo en la medida de sus posibilidades.

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el objetivo propuesto se ha seguido una metodología con los siguientes puntos y en el orden que se exponen a continuación: 1) selección de la plataforma a utilizar, 2) definición del contexto en el que se enmarca el juego, 3) definición del público al que se destina, 4) creación de los retos, pistas y normas en los que se basa el juego, y 5) creación de una encuesta de satisfacción.

1. Actualmente existen numerosas plataformas que permiten crear y diseñar un Escape Room de una manera muy sencilla: Breakout.Edu, Flippity, AdventuriQ, Google Slides, Genially, ... Para la creación de este Escape Room se ha empleado Genially [8] porque permite crear contenidos digitales interactivos de manera sencilla y brinda muchas posibilidades [9], es muy intuitiva y su punto fuerte es la interactividad y la animación. Por otra parte, es muy versátil y ofrece gran cantidad de posibilidades para el diseño y permite la posibilidad de interrelacionar distintas partes del Escape Room, sin ser imprescindible completar una parte de la dinámica para realizar otra distinta.

2. El Contexto en el que se desarrollará el juego será el Día Internacional de la Concientización sobre el Ruido, ya que se celebra todos los años el último miércoles del mes de abril, con el fin de promover el cuidado del ambiente acústico, la conservación de la audición y la concienciación sobre las molestias y daños que genera el ruido, que es lo que se pretende conseguir con el Escape Room diseñado.

3. El público al que se destinará es importante ya que marca el nivel de dificultad de las pruebas que se programen. Como la concienciación es fundamental realizarla desde edades tempranas se ha optado por un diseño que permita que el juego pueda realizarse a partir de los 11 años y sin límite de edad. Para los más pequeños se aconseja realizarlo en parejas, así pueden ayudarse entre ellos, e incluso pueden pedir ayuda al profesor, que les proporcionará alguna pista si se quedan atascados en algún punto. Además, pueden emplear un poco más de tiempo para su realización, en caso necesario.

4. Una vez decididos los puntos anteriores, hay que crear los retos y las pruebas, que en este caso concreto han sido 6, tratando de abarcar y transmitir una parte importante de conceptos relacionados con el ruido y sus efectos. También se ha considerado crucial que los juegos diseñados combinen la diversión y el aprendizaje, de tal manera que los jugadores no pierden el interés durante toda la actividad. Se utilizarán crucigramas, laberintos, preguntas de verdadero o falso, mensajes codificados con distintos lenguajes, ... Para descifrar estos mensajes codificados que aparecen en la dinámica se utilizan diferentes lenguajes que complementan la formación y cultura de los jugadores, como son:

- Sistema Braille [10], que utiliza seis puntos en relieve para representar cada letra y cada número, pensado para personas con discapacidad visual.
- Código Pigpen [11], que es un cifrado de sustitución simple, donde a cada letra del abecedario le corresponde un símbolo distinto, creado por los masones sobre los años 1700 para guardar información de forma privada.
- Cifrado César [12], es una de las técnicas más simples de cifrado. Sustituye cada letra del texto original por otra que se sitúa un número fijo de posiciones más adelante en el alfabeto. Cuentan los antiguos escritos romanos que el emperador Julio César utilizaba este tipo de encriptación para cifrar sus mensajes militares y que sus enemigos no pudieran leerlos si capturaban al mensajero, de ahí su nombre.

Con el fin de guiar y ayudar a los jugadores a superar las pruebas también se crean pistas, que se reparten por los distintos escenarios, que ayudan a avanzar en el juego, ya que permiten conocer las posibilidades que hay dentro de cada zona y cuáles son los objetivos a conseguir.

Por último, se definen las normas de la actividad, tales como el número de jugadores (1 o 2 en función de la edad), los materiales necesarios para desarrollarla (ordenador, papel y bolígrafo) y el tiempo establecido para la realización (aproximadamente una hora, dependiendo de la edad de los jugadores).

5. Una vez diseñado el Escape Room parece adecuado probarlo con diferentes grupos de edad para obtener información sobre él. Por este motivo, asociada a la actividad se diseña una encuesta sencilla y rápida de cumplimentar por parte de los jugadores. Consta de 5 preguntas relacionadas con el nivel de dificultad, el número de dígitos conseguido, el nivel de diversión, si sirve para aprender algún concepto nuevo relacionado con el ruido y si sirve para concienciar sobre los distintos efectos y problemas que puede provocar la exposición al ruido.

3. RESULTADOS

Los resultados del trabajo realizado que se presentan en esta sección se agrupan en tres apartados que se exponen a continuación: el Escape Room virtual diseñado, el material complementario y los resultados de la encuesta realizada.

3.2. Escape Room

El Escape Room virtual diseñado, cuya portada se muestra en la Figura 1, se puede consultar en [13].



Figura 1. Portada del Escape Room.

El juego se desarrollará en una ciudad imaginaria muy ruidosa llamada Ruilandia. La alcaldesa quiere celebrar el día Internacional de Concienciación sobre el Ruido en el Centro Cultural de la ciudad, pero se ha olvidado de la contraseña de entrada al centro. Con la resolución de cada uno de los seis juegos propuestos se obtiene un número e introduciendo los 6 dígitos en el orden correcto permite la entrada al Centro Cultural. Para ayudar a los jugadores a superar las pruebas se han repartido pistas por toda la ciudad.

El escape consta de 6 juegos. A la hora de elaborar los juegos diseñados, como ya se ha comentado anteriormente, se ha intentado abarcar una parte importante de conceptos relacionados con el ruido y sus efectos sobre la salud, como los siguientes:

- Ambientes más ruidosos presentes en la vida cotidiana (las obras, los espacios de ocio, ...) y aquellos que necesitan mayor protección. Por este motivo sobre el plano de la ciudad, Figura 2, se han elegido cinco zonas por ser a las que

se hace referencia en la legislación sobre la gestión del ruido (zona residencial, colegio, obras, bar/discoteca y centro cultural).



Figura 2. Plano de la ciudad de Ruilandia

➤ Nivel de ruido asociado a distintos ambientes. Se han elegido 5 ambientes que pueden ser los más afines al público al que va dirigida la actividad (una conversación normal, patio del colegio, biblioteca o una discoteca). La Figura 3 muestra dos de las pruebas en las que el jugador tiene que marcar el rango adecuado asociado al ambiente correspondiente. En otro juego se hace referencia al nivel máximo permitido en el puesto de trabajo.



Figura 3. Niveles de ruido asociados a diferentes ambientes

➤ Efectos fisiológicos y psicológicos que ocasiona la exposición al ruido. Se hace referencia a los problemas de audición, el estrés y la ansiedad, los problemas cardiovasculares, respiratorios y digestivos, la irritabilidad, la falta de concentración y las alteraciones del sueño. En la Figura 4 se muestra uno de los juegos para aprender los efectos que produce el ruido. Este juego en concreto se resuelve descifrando el mensaje con el código Pigpen, y hay que pulsar en la imagen, con el ratón, sobre el órgano concreto afectado.



Figura 4. Efectos del ruido sobre las personas

➤ Formas de evitar el ruido y de protegerse frente al mismo. Se hace referencia a no permanecer mucho tiempo en ambientes ruidosos o a utilizar protectores auditivos en dichos ambientes. En la Figura 5 se observa un armario con varios objetos y para superar la prueba hay que elegir el que se utiliza para protegerse del ruido y, al pulsar sobre él, se obtiene un mensaje y uno de los dígitos del código de acceso buscado.



Figura 5. Protección frente al ruido

➤ Recomendación de la OMS para tener en cuenta la norma 60-60 para el uso de los auriculares [14] ya que los jóvenes son los que más los utilizan y está provocando serios problemas. La norma 60-60 consiste en evitar el uso de los auriculares más de 60 minutos al día y a más del 60 % de su volumen, tal y como se muestra en la Figura 6. Los efectos del ruido sobre las personas están relacionados con el tiempo de exposición y la intensidad sonora, por ello es muy importante que lo aprendan cuanto antes.



Figura 6. Recomendación 60-60 de la OMS

➤ Se introducen términos relacionados con el ruido y los problemas que origina, como hipoacusia, inteligibilidad, tímpano, clasificación de los sonidos en graves y agudos en función de su frecuencia, y que la molestia producida por ambos (graves y agudos) es diferente. La Figura 7 muestra unas definiciones relacionadas con estos términos que sirven para completar el crucigrama.



Figura 7. Terminología relacionada con el ruido

➤ También hay un juego de verdadero/falso, cuya finalidad es aportar datos y conceptos para concienciar que el ruido es un problema real y actual en los distintos ámbitos de la sociedad que se frecuentan habitualmente. En este juego se trabajan conceptos como el nivel sonoro recomendable en el aula del colegio y en el puesto de trabajo, el porcentaje de centros educativos españoles que sufren contaminación acústica en las aulas, etc. En las afirmaciones en las que la respuesta es falsa, como la que muestra la Figura 8, se da la solución correcta.



Figura 8. Conceptos sonoros en distintos ámbitos sociales

Por último, hay que destacar que durante el desarrollo del juego hay una serie de elementos interactivos que esconden algún tipo de mensaje. La imagen de la izquierda de la Figura 9 muestra un ejemplo concreto de uno de ellos, localizado en el bar. Otros mensajes también presentes en el juego son: i) En el colegio: *¿Te has dejado la mochila en el colegio? Seguro que te has distraído con la música tan alta, y* ii) En la zona de obras: *Esta máquina hace demasiado ruido, tengo que ponerme los protectores auditivos.*



Figura 9. Mensajes asociados a elementos interactivos

Al finalizar el juego aparecen consejos a modo de resumen de todo lo que se ha visto a lo largo del Escape Room, imagen de la derecha de la Figura 9. Y por último se felicita a los jugadores por haber completado la dinámica y poder celebra el Día Internacional de Concienciación sobre el Ruido en el Centro cultural.

3.2. Documentación adicional

La actividad propuesta se puede realizar en torno al día internacional de Concienciación sobre el Ruido, o cualquier otro día, en colegios, centros cívicos, etc. Por ello, como complemento al Escape Room resulta interesante elaborar un marcapáginas, un cartel/póster y un manual con las soluciones para el profesor a cargo de la realización de la actividad.

El marcapáginas se ha diseñado para entregar a los jugadores después de realizar el Escape Room y poder releer y recordar lo más importante de lo aprendido con el juego (lugares más comunes en los que una persona puede estar expuesta al ruido, problemas de salud que puede ocasionar el ruido, consejos y recomendaciones a seguir para evitar en la medida de lo posible situaciones que incluyan la exposición del ruido y distintas formas de protegerse frente al mismo). La Figura 10 muestra las dos caras del marcapáginas.



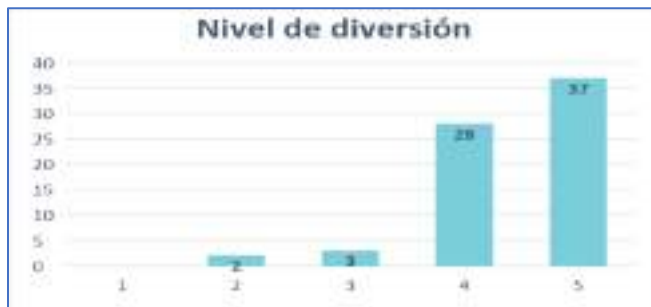
Figura 10. Anverso y reverso del marcapáginas

El diseño del póster es similar al del marcapáginas (las ideas y conceptos sobre el ruido mostrados son los mismos, pero distribuidos de distinta manera) y se puede utilizar para difundir la actividad añadiendo un cuadro de texto indicando lugar, fecha y hora de la misma.

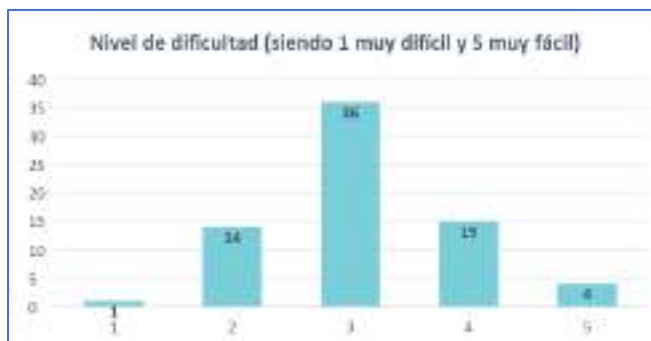
Para ayudar a los promotores de la actividad, también se ha elaborado un manual con las indicaciones necesarias para desarrollar la actividad, un código QR que enlaza al Escape Room, las soluciones de cada una de las pruebas y el material para su difusión (póster y marcapágina). Se puede disponer del manual bajo previa petición por correo electrónico.

3.3. Encuestas

Para evaluar el funcionamiento y la efectividad del Escape Room se ha realizado la actividad con dos grupos de estudiantes de rangos de edad diferente, uno de 11-12 años y otro de 17-18, que ha supuesto un total de 70 participantes. Al final de la actividad contestaron a una encuesta sencilla para conocer su opinión. Los resultados más destacados de la encuesta ponen de manifiesto que el 93% de los encuestados consideran divertida la actividad, Figura 11a, y que su nivel de dificultad es medio para el 51 %, y fácil para el 27 %, Figura 11b.



(a)



(b)

Figura 11. Resultados de la encuesta de opinión

También se preguntó a los participantes en la actividad que si tras haber realizado el Escape Room habían aprendido algún

concepto o noción nueva relacionada con el ruido (el 96% responde que sí), y si con esta propuesta de Escape Room se consigue concienciar a las personas sobre el ruido (el 97% responde que sí).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se considera que la actividad “Escapa del Ruido” diseñada; compuesta por un Escape Room, un marcapáginas, un póster y un manual de ayuda; permite transmitir conceptos sobre acústica, ayuda a conocer efectos fisiológicos y psicológicos originados por el ruido, enseña formas de evitarlo y cómo protegerse del mismo. Por otra parte, es una actividad entretenida y práctica para usarla como complemento educativo para la concienciación, ya que se desarrollan habilidades cognitivas y se fomentan emociones que incentivan las ganas de seguir jugando. Para conseguir el principal objetivo propuesto al diseñar la actividad: disminuir los efectos nocivos del ruido en las personas desde edades tempranas; es necesario seguir trabajando, sobre todo en su difusión, para que llegue al mayor número de usuarios posible, y complementarla con otro tipo de actividades a lo largo del tiempo para insistir en el tema, porque una sola acción puede no ser suficiente. Otras actividades que se pueden utilizar para la concienciación son: charlas de distintos profesionales relacionados con el tema, visitas a instalaciones con diferentes características acústicas, pruebas audiométricas en jóvenes, mostrar la molestia de diferentes tipos de ruido... y es preciso hacerlo cuanto antes, ya que, según la OMS [15], más de 1000 millones de personas de edades comprendidas entre los 12 y los 35 años, que coincide con el rango de edad definido para el público objeto de la actividad, corren el riesgo de perder la audición debido a la exposición prolongada y excesiva a música fuerte y otros sonidos recreativos. Estos riesgos pueden ocasionar consecuencias importantes en la salud física y mental.

Cabe mencionar que, ya en el mes de abril, en torno al Día Internacional de Concienciación sobre el ruido, se hicieron pequeños avances en cuanto a intentar difundir la actividad mostrada en este trabajo. Se publicaron noticias al respecto tanto en la web de la Sociedad Española de Acústica [16], el Portal de Educación de la Junta de Castilla y León [17] y en la web de la Universidad de Valladolid [18]. A pesar de este pequeño avance, sigue siendo necesario una mayor difusión de esta actividad de concienciación, en colegios, centros cívicos, asociaciones culturales...

5. CONCLUSIONES

El Escape Room se ha diseñado de forma que resulte estimulante para sus jugadores, con una dificultad que no es ni muy alta ni muy baja, consiguiendo mantener la atención y el sentimiento de competitividad activos durante toda la actividad. Por tanto, se puede concluir que es una buena

actividad para aprender conceptos fundamentales relacionados con el ruido y diferentes formas de protegerse del mismo, con el fin de disminuir los problemas que ocasiona tanto en la salud de las personas como en el medio ambiente. Además, el complemento del marcapáginas puede ser muy efectivo porque permite recordar las ideas más importantes aprendidas con el juego.

Por otra parte, con este trabajo se contribuye a la consecución de varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, como el 3 y el 4, entre otros. La actividad se ha diseñado con el fin de prevenir los efectos nocivos del ruido desde edades tempranas y disminuir la contaminación acústica, lo que contribuirá a mejorar la salud y el bienestar de las personas (ODS 3 – Salud y Bienestar). Dicha actividad es un complemento educativo que puede realizarse en torno al Día Internacional sobre Concienciación sobre el Ruido o en cualquier época del año (ODS 4 – Educación de calidad).

6. AGRADECIMIENTOS

Las autoras de este artículo quieren agradecer la participación de los alumnos y profesores de centros docentes de Valladolid, en esta dinámica “Escapa del Ruido”, propuesta dentro de las actividades organizadas por la Universidad de Valladolid en torno a la Semana de la Ciencia de Castilla y León, en noviembre de 2022.

7. REFERENCIAS

- [1] World Health Organization –WHO (2021). Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/02-03-2021-who-1-in-4-people-projected-to-have-hearing-problems-by-2050>
- [2] Borrás Gené, Oriol (2015). Fundamentos de Gamificación. Monografía (Documentación). Rectorado (UPM), Madrid.
- [3] Nicholson, S. (2018). Creating engaging escape rooms for the classroom. *Childhood Education*, 94(1), 44-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00094056.2018.1420363>
- [4] Armenteros, Y. Q. (2011). El ruido también contamina. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 11(21).
- [5] Chávez, J. R. (2006). Ruido: Efectos sobre la salud y criterio de su evaluación al interior de recintos. *Revista ciencia y Trabajo*, 8(20), 42-46.
- [6] García A. 2002. Efectos del Ruido sobre la Salud. Disponible en: <http://www.cabanyal.com/Documentacion/ruido.htm>
- [7] Taboada, D. (2007). Efectos del Ruido sobre la Salud. Disponible en: http://www.juristasruidos.org/Documentacion/Ruido_y_Salud.pdf
- [8] Genially. (2023). Genially, la herramienta online para crear contenido interactivo. Disponible en: <https://genial.ly/es/>
- [9] DIgital, C. (2023). 2.- ¿Qué es Genial.ly? | Genial.ly: infografías interactivas. Disponible en: https://www.cyldigital.es/sites/default/files/selflearning/scorm/cdb9566c/2_qu_es_genially.html
- [10] ONCE (2023). Braille en español, alfabeto, números, y sistema. Disponible en: <https://www.once.es/servicios-sociales/braille>
- [11] Código Pigpen (2023). Disponible en: <https://demasoneria.com/cifrado-francmason/>
- [12] González, A. (2020). ¿Qué es el cifrado César y cómo funciona? Ayuda Ley Protección Datos. Disponible en: <https://ayudaleyprotecciondatos.es/2020/06/10/cifrado-cesar/>
- [13] Escape Room – Escapa del Ruido (2023). Disponible en: <https://view.genial.ly/630df232a701930018454db2/interactive-content-copia-concienciacion-sobre-los-efectos-del-ruido>
- [14] Kim G, Shin J, Song C, Han W. (2021) Analysis of the Actual One-Month Usage of Portable Listening Devices in College Students. *Int J Environ Res Public Health*, 18(16), 8550. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph18168550>
- [15] Organización Mundial de la Salud – OMS (2022). La OMS publica una nueva norma para hacer frente a la creciente amenaza de la pérdida de audición. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/02-03-2022-who-releases-new-standard-to-tackle-rising-threat-of-hearing-loss>
- [16] Sociedad Española de Acústica - SEA (2023). Disponible en: <https://www.sea-acustica.es/dia-internacional-ruido/>
- [17] Junta de Castilla y León (2023). Portal de Educación. Disponible en: <https://www.educa.jcyl.es/es/programas/scape-room-escapa-ruido?skipcache=9126056832>
- [18] Universidad de Valladolid (2023). La Universidad de Valladolid se suma a la conmemoración del Día Internacional de Concienciación contra el Ruido con el Scape Room virtual “Escapa del ruido”. Disponible en: https://comunicacion.uva.es/es_ES/detalle/La-Universidad-de-Valladolid-se-suma-a-la-conmemoracion-del-Dia-Internacional-de-Concienciacion-contra-el-Ruido-con-el-Scape-Room-virtual-Escapa-del-ruido/