



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi degli impatti energetici e delle
emissioni di gas climalteranti di
tecnologie e componenti per l'efficienza
energetica di un edificio ZEB ad uso
terziario in un'ottica di ciclo di vita

M. Cellura, A. Brunetti, M.A. Cusenza, F. Guarino, V. La Rocca, S.
Longo, D. Panno

Report RdS/PTR2021/106

ANALISI DEGLI IMPATTI ENERGETICI E DELLE EMISSIONI DI GAS CLIMALTERANTI DI TECNOLOGIE E COMPONENTI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DI UN EDIFICIO ZEB AD USO TERZIARIO IN UN'OTTICA DI CICLO DI VITA

M. Cellura, A. Brunetti, M.A. Cusenza, F. Guarino, V. La Rocca, S. Longo, D. Panno (Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Palermo)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.5 - Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica di un edificio terziario in ottica LCA*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica degli edifici in un'ottica di ciclo di vita*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Carmen Lavinia

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Palermo: Prof. Maurizio Cellura

Indice

SOMMARIO	4
INTRODUZIONE	6
1 DESCRIZIONE DEL CASO-STUDIO	7
1.1 DESCRIZIONE DEL CASO-STUDIO: INVOLUCRO	7
1.2 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO: LAYOUT D'IMPIANTO TERMICO	13
2 MODELLIZZAZIONE GEOMETRICA.....	16
2.1 ULTERIORI ASSUNZIONI DI MODELLIZZAZIONE E SIMULAZIONE.....	24
3 RISULTATI.....	25
3.1 CONFIGURAZIONE 1: CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA.....	25
3.2 CONFRONTO TRA CONFIGURAZIONE 1 E 2: CONSUMI E GENERAZIONE DI ENERGIA	26
3.3 LOAD MATCHING E INTERAZIONE CON LA RETE: CONFIGURAZIONE 1	27
3.4 SINTESI CONFIGURAZIONE 1 E 2	28
4 LIFE CYCLE ASSESSMENT.....	30
4.1 DEFINIZIONE DELL'OBBIETTIVO.....	30
4.1.1 <i>Obiettivi dello studio e descrizione del sistema di prodotto</i>	30
4.2 DEFINIZIONE DEL CAMPO DI APPLICAZIONE	31
4.2.1 <i>Unità funzionale</i>	31
4.2.2 <i>Confini del sistema</i>	32
4.2.3 <i>Categorie di impatto ambientale e metodologie di valutazione degli impatti</i>	33
5 ANALISI DI INVENTARIO DI CICLO DI VITA E QUALITÀ DEI DATI	33
5.1 ANALISI DI INVENTARIO – FASE DI PRODUZIONE (MODULO A).....	33
5.2 ANALISI DI INVENTARIO – FASE D'USO (MODULO B)	37
5.3 ANALISI DI INVENTARIO – FASE DI SOSTITUZIONE (MODULO B4)	37
5.4 ANALISI DI INVENTARIO – CONSUMO DI ENERGIA (MODULO B6)	39
5.5 ANALISI DI INVENTARIO – FASE DI FINE VITA (MODULO C).....	39
5.6 ANALISI DI INVENTARIO – BENEFICI E ONERI OLTRE I CONFINI DEL SISTEMA (MODULO D).....	42
6 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI ENERGETICI E AMBIENTALI DI CICLO DI VITA: RISULTATI E DISCUSSIONE.....	43
6.1 IMPATTI ENERGETICO – AMBIENTALI – MODULO A	43
6.2 IMPATTI ENERGETICO – AMBIENTALI – MODULO B	75
6.3 IMPATTI ENERGETICO – AMBIENTALI – MODULO C	87
6.4 BENEFICI ENERGETICO – AMBIENTALI – MODULO D	94
6.5 IMPATTI ENERGETICO – AMBIENTALI DI CICLO DI VITA.....	94
7 CONCLUSIONI.....	101
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	102

Sommario

Il presente report descrive le attività svolte dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Palermo per lo sviluppo della ricerca dal titolo "Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica di un edificio ZEB ad uso terziario in un'ottica di ciclo di vita".

L'attività è stata svolta in accordo ai seguenti step procedurali:

- Selezione di due differenti configurazioni di un edificio ad uso ufficio, per le quali sono state individuate differenti caratteristiche termofisiche di involucro edilizio e impiantistiche;
- Modellizzazione e simulazione in regime dinamico delle due configurazioni;
- Analisi del bilancio di energia elettrica annuo, in termini di generazione e consumo;
- Stima, attraverso l'applicazione della metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA), degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti dei principali componenti del sistema involucro - impianto.

In dettaglio le due configurazioni esaminate sono:

- Configurazione 1: edificio con isolamento termico dell'involucro realizzato in polistirene espanso estruso, con un sistema impiantistico costituito da due unità esterne Variable Refrigerant Flow, 25 unità interne ad espansione diretta, un sistema di ventilazione meccanica controllata ed un impianto fotovoltaico connesso alla rete e integrato con un accumulo elettrico.
- Configurazione 2: edificio con isolamento termico dell'involucro realizzato con fibre di cellulosa, con sistema impiantistico costituito da due unità esterne VRF, 25 unità interne ad espansione diretta, un sistema di ventilazione meccanica controllata e un impianto fotovoltaico connesso alla rete senza l'integrazione di un accumulo elettrico.

Entrambe le configurazioni raggiungono il target di nZEB secondo le definizioni proposte dall'Agenzia Internazionale dell'Energia, dal National Renewable Energy Laboratory e dal Department of Energy.

I risultati dell'analisi energetica hanno evidenziato un'equivalenza termofisica delle due configurazioni e una minima differenza dei flussi di energia in ingresso e uscita dai confini del sistema. Inoltre, sono state rilevate differenze nella contemporaneità di consumi e generazione a causa della presenza del sistema di accumulo di energia elettrica nella configurazione 1.

I risultati dell'analisi LCA hanno evidenziato che l'energia incorporata di ciclo di vita è maggiore del 5% nella configurazione 1 rispetto alla configurazione 2. Ed è principalmente imputabile all'utilizzo di energia in fase d'uso (modulo B6).

Con riferimento alle prestazioni ambientali per la configurazione 2, queste si riducono rispetto a quelle della configurazione 1 con percentuali variabili da un valore minimo di circa il 2% per il GWP_{LULUC} ad un massimo del 4% per il GWP e GWP_f mentre la categoria d'impatto ambientale GWP_b aumenta del 12%.

Nella configurazione 1 il modulo B6 è responsabile del maggiore contributo al GWP_b , il modulo A al GWP e GWP_f , mentre il modulo B4 alla categoria GWP_{LULUC} .

Nella configurazione 2 il modulo B6 è responsabile del maggiore contributo al GWP e al GWP_b , il modulo A ha un impatto maggiore nella categoria d'impatto GWP_f , il modulo B4 ha un impatto maggiore nella categoria GWP_{LULUC} .

Complessivamente con riferimento al solo involucro, i risultati evidenziano che l'isolante in fibra di cellulosa presenta prestazioni energetico-ambientali migliori rispetto all'isolante XPS, con riduzione degli impatti variabili dal 20% per GWP , GWP_b e GWP_f al 27% per l'energia incorporata, mentre le prestazioni ambientali peggiorano del 2% per la categoria GWP_{LULUC} .

Con riferimento al solo sistema impiantistico si osserva che l'installazione di un sistema di accumulo riduce l'import di energia dalla rete di circa 3000 kWh e consente di aumentare il livello di load match dell'edificio di circa il 30%.

Inoltre, l'utilizzo di tale sistema consente di ridurre l'energia incorporata del 2% e il GWP, GWP_f e GWP_b di circa il 6%, 6% e il 15% rispettivamente mentre si osserva un incremento di circa il 4% del GWP_{LULUC} .

Infine, con riferimento al sistema involucro-impianto si osserva che i benefici indotti dall'impiego di un sistema di accumulo (configurazione 1) sulla maggior parte delle categorie di impatto esaminate sono annullati dal maggiore impatto connesso all'impiego dell'isolante in XPS.

Introduzione

Nel sesto Assessment Report dell'Intergovernmental Panel on climate change (IPCC)[1] si evidenzia un notevole rischio di incremento della temperatura media dell'aria a scala globale. L'entità dello scostamento attuale e potenziale della temperatura suddetta rispetto ai valori riscontrabili nel periodo preindustriale dipende dalla concentrazione di CO₂ e di altri gas climalteranti, che presentano trend in significativa crescita qualora non si rafforzino azioni mirate a ottenere una significativa decarbonizzazione a scala globale.

Secondo lo scenario più ottimistico è probabile che la temperatura dell'aria media, nel ventennio 2081-2100, non superi 1,0°C-1,8°C, posto che venga raggiunta la neutralità climatica entro il 2055 e conseguita la cattura con successivo stoccaggio annuale progressivo di CO₂ di 20GT CO₂/anno, entro il 2100.

Lo scenario più negativo prevede che con un continuo aumento delle emissioni fino al 2100 sarà atteso un incremento della temperatura media dell'aria superiore ai 5°C entro il 2100.

Per prevenire potenziali ripercussioni negative in tutti i settori dell'economia è necessaria una transizione energetica che porti alla decarbonizzazione e a uno sfruttamento circolare delle risorse.

A tal fine, la Commissione Europea ha presentato l'11 dicembre 2019 il Green Deal Europeo[2], che rappresenta un importante contributo alla strategia a lungo termine dell'Unione Europea per raggiungere la neutralità di carbonio entro il 2050 e ha come scopo la trasformazione dell'Unione in un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse, competitiva e in grado di dissociare la crescita economica dall'impiego massiccio di risorse.

Tra le principali misure prospettate dal Green Deal Europeo, si evidenzia l'approvazione di una "legge europea per il clima"[3], vagliata con il Regolamento (UE) 2021/1119 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 giugno 2021, che costituisce un preciso riferimento per il conseguimento della neutralità climatica e stabilisce due obiettivi vincolanti: il raggiungimento della neutralità climatica nell'UE entro il 2050 e la riduzione interna netta delle emissioni di gas serra di almeno il 55% (entro il 2030) rispetto ai livelli del 1990. Risulta pertanto di importanza cruciale incrementare l'efficienza energetica nei settori più energivori, tra cui quello dell'edilizia, responsabile di circa il 40% del consumo di energia dell'Unione Europea e di circa il 36% delle emissioni di CO₂ equivalente dell'UE.

Tra le misure introdotte, il Consiglio dell'Unione Europea ha approvato l'11 giugno 2021 la strategia "un'ondata di ristrutturazioni"[4] che mira a intensificare gli sforzi di ristrutturazione in tutta l'UE raddoppiando i tassi di ristrutturazione orientati alla riduzione dei consumi energetici, all'incremento della produzione di energia con tecnologia alimentata da fonti rinnovabili e alla crescita dell'efficienza energetica entro il 2030.

Nel contesto sinteticamente descritto in precedenza, il concetto di edifici ad energia quasi zero rappresenta un cambiamento di paradigma fondamentale per il settore edile e in generale per il settore dell'energia: la diffusione di Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) garantisce una marcata riduzione del fabbisogno energetico dell'energia consumata durante la fase d'uso e una crescita della produzione di energia ottenuta da fonti rinnovabili.

A tale riduzione si accompagna altresì un incremento talmente significativo dei contributi di energia e di impatti ambientali incorporati, da risultare comparabili a quello evidenziabili in fase d'uso. Ciò comporta l'opportunità di estendere l'analisi energetica dell'edificio includendo una prospettiva di ciclo di vita, ad esempio tramite l'utilizzo della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) per evitare di spostare impatti energetici ed ambientali da una fase all'altra del ciclo di vita o da una categoria di impatto all'altra.

In questo contesto si inseriscono le attività dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, per una attività di ricerca dal titolo "Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica di un edificio ZEB ad uso terziario in un'ottica di ciclo di vita".

In dettaglio, il presente Report si articola nel seguente modo:

- Selezione di due configurazioni di edificio ad uso ufficio con caratteristiche termofisiche analoghe;
- Stima dei consumi energetici in fase d'uso delle succitate configurazioni;

- Modellizzazione e simulazione, in regime dinamico, delle due configurazioni utilizzando soluzioni impiantistiche basate sul vettore energetico elettricità in combinazione con soluzioni impiantistiche di generazione di energia ottenuta da tecnologie alimentate da fonti rinnovabili;
- Calcolo del bilancio di energia elettrica annuo, in termini di generazione e consumo al fine di verificare l'eventuale raggiungimento del "target" nZEB.
- Descrizione degli obiettivi dello studio LCA e del campo di applicazione;
- Descrizione dell'inventario di ciclo di vita dell'edificio oggetto dello studio;
- Valutazione degli impatti energetici e ambientali di ciclo di vita.

1 Descrizione del caso-studio

Si riporta nel seguito la descrizione delle configurazioni analizzate, dei rispettivi componenti di impianto e dei sistemi alimentati da fonti rinnovabili utilizzati nelle analisi. La tabella 1 riporta una sintesi schematica delle due configurazioni oggetto di analisi.

Tabella 1 Dettaglio delle configurazioni di analisi

	Configurazione 1	Configurazione 2
Involucro	Isolante <u>XPS</u>	Isolante <u>Cellulosa</u>
Impianto termico e condizionamento		VRF e VMC
Sistema di accumulo elettrico	Presente	<u>Non presente</u>
Generazione in sito		Fotovoltaico

1.1 Descrizione del caso-studio: Involucro

L'edificio oggetto di analisi delle due diverse configurazioni menzionate è situato in Italia, a Roma (Zona climatica D, Gradi Giorno: 1415). L'edificio consta di due elevazioni: piano terra e primo piano (altezza utile: 3,40 m; superficie netta: 546,24 m²), per una superficie netta complessiva di 1092,48 m². Il piano terra comprende l'androne di ingresso, il corridoio, otto uffici, due bagni e un vano scale. Il primo piano invece comprende sei uffici, due bagni, un corridoio, una sala pranzo e una sala server. Le viste esterne dell'edificio sono mostrate nelle figure 1- 4, le viste in pianta delle due elevazioni nelle figure 5 e 6.

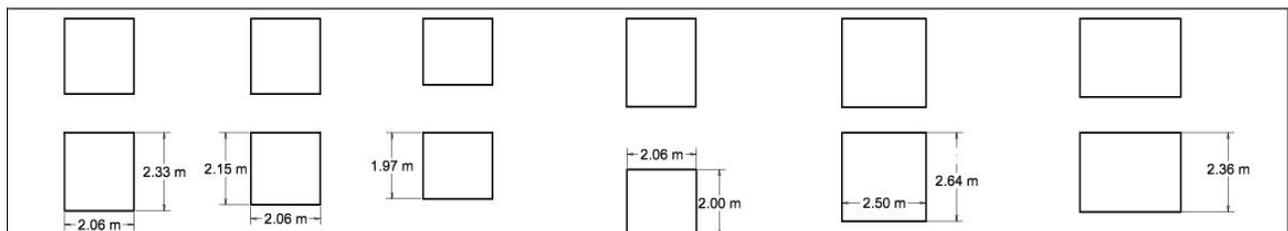


Figura 1 Vista Sud caso studio

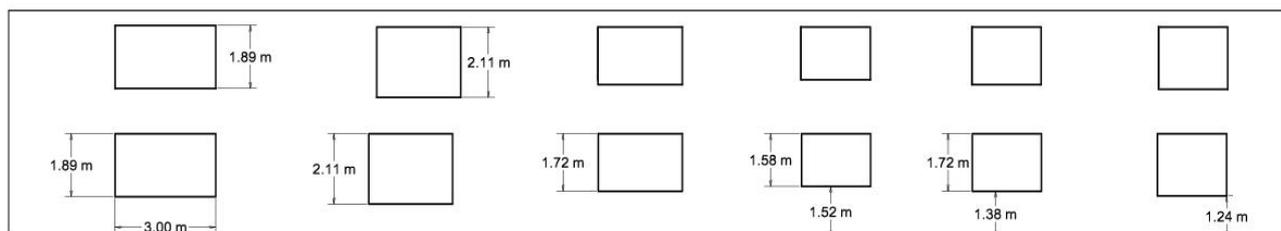


Figura 2 Vista Nord caso studio

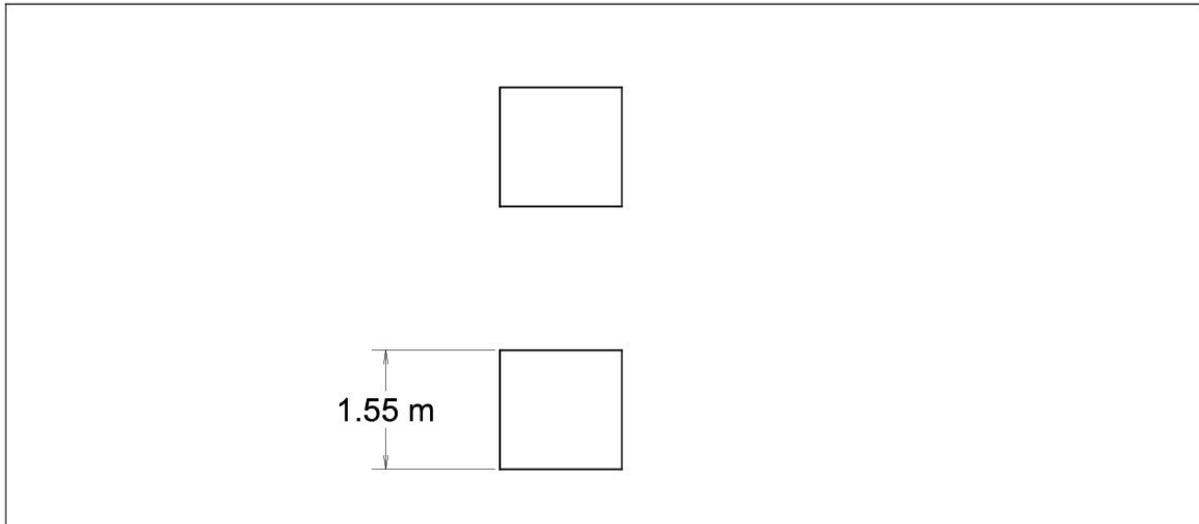


Figura 3 Vista Ovest caso studio

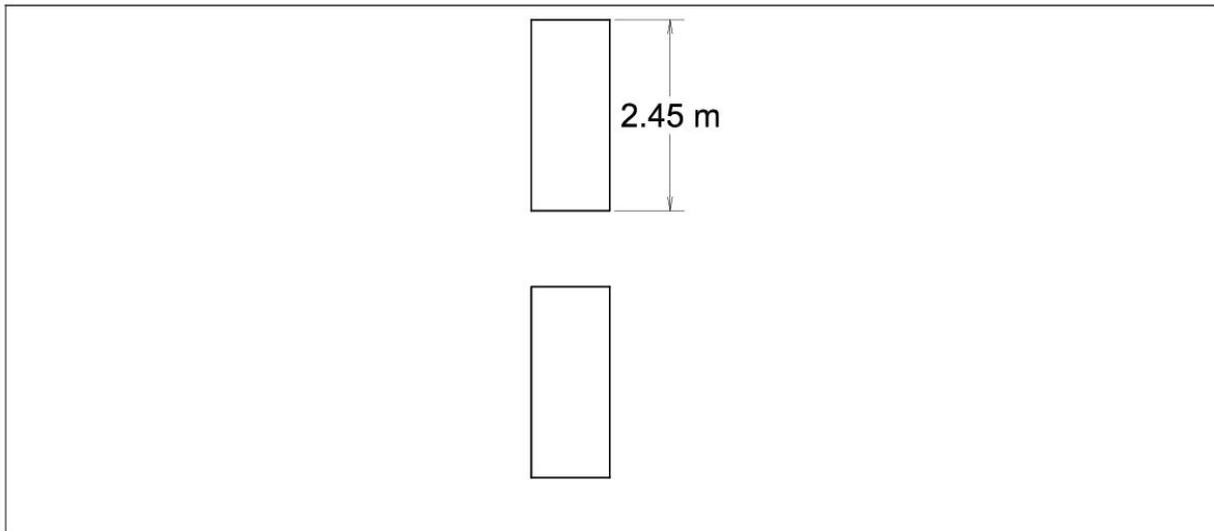


Figura 4 Vista Est caso studio

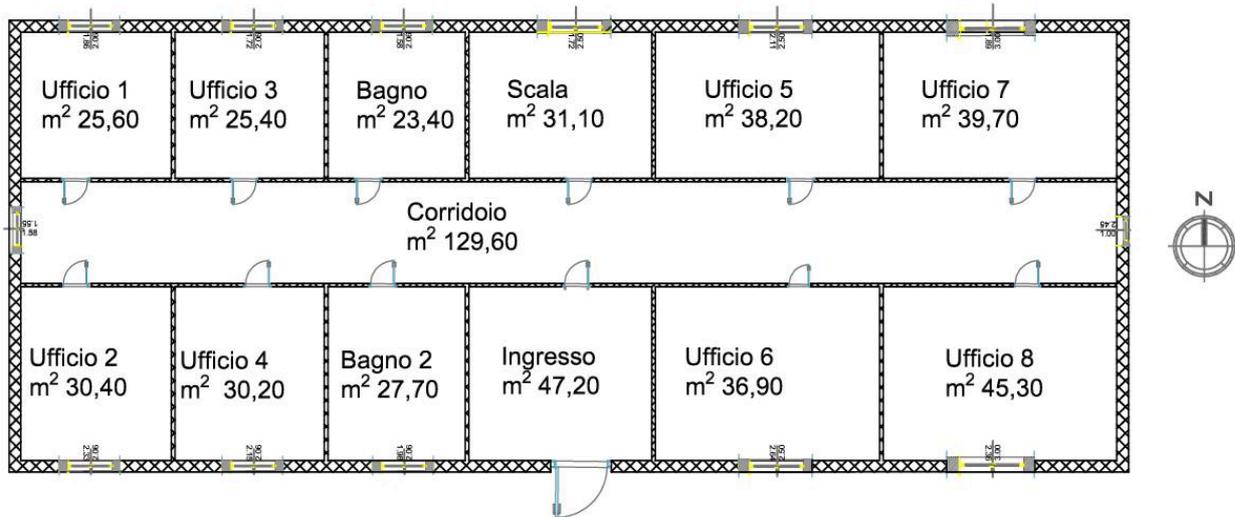


Figura 5 Planimetria del piano terra

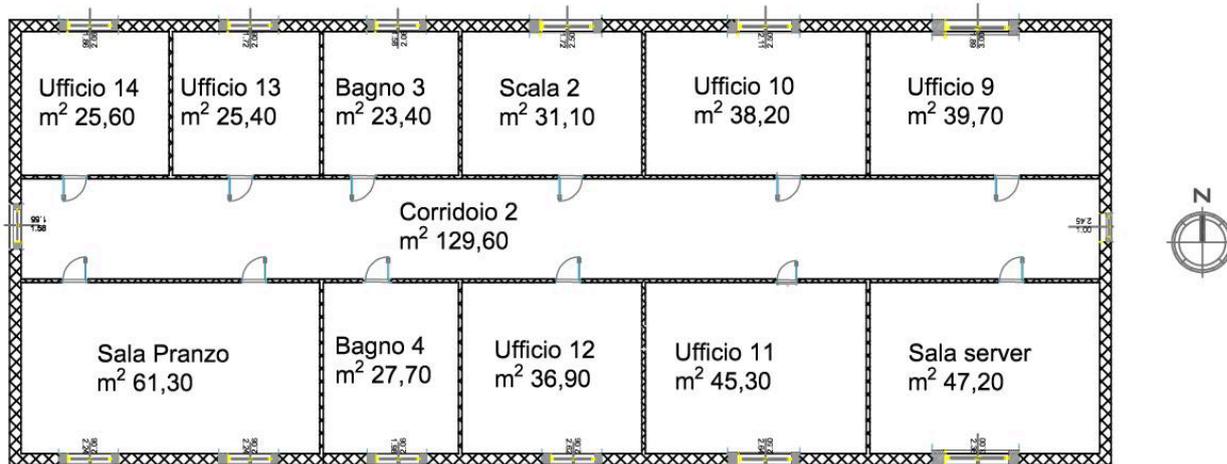


Figura 6 Planimetria del primo piano

Si riportano in tabella 2 (Configurazione 1) e tabella 3 (Configurazione 2) le stratigrafie di involucro, mentre in tabella 4 sono indicate le proprietà termofisiche dei materiali. Si riportano, inoltre, in tabella 5 i limiti normativi per i valori di trasmittanza termica (U_{rif}) relativi all'edificio di riferimento, come indicato nel Decreto "Requisiti Minimi" del 26 giugno 2015 [5], e ai valori calcolati della trasmittanza termica degli elementi di involucro (U).

Tabella 2 Stratigrafia dell'involucro edilizio 1

Pavimento contro terra	Pavimento di interpiano	Pareti divisorie	Pareti perimetrali verticali	Copertura esterna
<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020
Malta cementizia Spessore: [m] 0,080	Malta cementizia Spessore: [m] 0,080	Laterizio forato Spessore: [m] 0,080	Laterizio forato Spessore: [m] 0,060	Solaio Spessore: [m] 0,160
Isolante XPS Spessore: [m] 0,100	Cemento armato Spessore: [m] 0,250	Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	Aria Spessore: [m] 0,010	Guaina impermeabilizzante Spessore: [m] 0,010
Cemento armato Spessore: [m] 0,500	Isolante XPS Spessore: [m] 0,100 Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020		Laterizio forato Spessore: [m] 0,230 Isolante XPS Spessore: [m] 0,060 Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	Isolante XPS Spessore: [m] 0,140 Massetto Spessore: [m] 0,020 Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,030

Tabella 3 Stratigrafia dell'involucro edilizio 2

Pavimento contro terra	Pavimento di interpiano	Pareti divisorie	Pareti perimetrali verticali	Copertura esterna
<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020
Malta cementizia Spessore: [m] 0,080	Malta cementizia Spessore: [m] 0,080	Laterizio forato Spessore: [m] 0,080	Laterizio forato Spessore: [m] 0,060	Solaio Spessore: [m] 0,160
Isolante fibra di cellulosa Spessore: [m] 0,100 Cemento armato Spessore: [m] 0,500	Cemento armato Spessore: [m] 0,250 Isolante fibra di cellulosa Spessore: [m] 0,110 Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	Aria Spessore: [m] 0,010 Laterizio forato Spessore: [m] 0,230 Isolante fibra di cellulosa Spessore: [m] 0,070 Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,020	Guaina impermeabilizzante Spessore: [m] 0,010 Isolante fibra di cellulosa Spessore: [m] 0,160 Massetto Spessore: [m] 0,020 Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,030

Tabella 4 Caratteristiche termofisiche dei materiali

Materiale	Conducibilità [W/(m K)]	Calore specifico [J/(kg K)]	Densità [kg/m ³]
Ceramica	1	455	1.800
Malta cementizia	0,150	840	2.000
Cemento armato	0,730	840	2.400
Isolante XPS	0,035	1.450	35
Isolante in fibra cellulosa	0,038	2.544	45
Gesso-Intonaco	0,290	850	1.530
Laterizio forato	0,109	1.000	725
Legno	0,150	1.630	608
Guaina impermeabilizzante	0,170	840	615
Solaio	0,559	1.000	900

Tabella 5 Valori di trasmittanza di elementi dell'involucro edilizio

Elemento strutturale	U	U	U _{rif}
	[W/(m ² K)] Involucro n.1	[W/(m ² K)] Involucro n.2	[W/(m ² K)]
Pareti perimetrali verticali	0,209	0,204	0,290
Copertura esterna	0,210	0,200	0,260
Pavimento di interpiano	0,245	0,242	0,800
Pavimento controterra	0,250	0,250	0,290
Chiusure trasparenti verso l'esterno	1,400	1,400	1,800

Per ciascun piano la superficie disperdente totale S è pari a 765 m².

Poiché per ciascun piano il volume climatizzato V è di 1.806,6 m³, il rapporto $\frac{S}{V}$ per i due piani è circa 0,4. Gli infissi sono caratterizzati dall'uso di doppio vetro con argon nell'intercapedine (4/16/4) e presentano un valore di fattore solare g e di trasmittanza termica pari rispettivamente a 0,589 e 1,40 [W/(m² K)].

In relazione all'involucro dei due piani si riportano, nelle tabelle 6 e 7, le aree delle superfici opache e di quelle vetrate per le differenti esposizioni dell'immobile.

Tabella 6 Caratteristiche dell'involucro del piano terra per esposizione

Orientamento	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]	Superficie disperdente totale [m ²]
Est	50,12	2,45	52,57
Sud	102,44	26,96	129,40
Ovest	50,12	2,45	52,57
Nord	103,52	25,88	129,40

Tabella 7 Caratteristiche dell'involucro del primo piano per esposizione

Orientamento	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]	Superficie disperdente totale [m ²]
Est	50,12	2,45	52,57
Sud	97,05	32,35	129,40
Ovest	50,12	2,45	52,57
Nord	103,52	25,88	129,40

Nello specifico, per ciascun ambiente di ogni piano le tabelle 8 (piano terra) e 9 (primo piano) riportano le superfici opache e vetrate costituenti l'involucro esterno, in funzione dell'esposizione.

Tabella 8 Dettaglio dell'involucro del piano terra

Orientamento	Locale	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]
Est	Corridoio 1	9,79	2,45
	Ufficio 7	18,77	-
	Ufficio 8	21,56	-
Sud	Ufficio 2	14,38	4,79
	Ufficio 4	13,26	4,42
	Bagno 2	12,21	4,07
	Ufficio 6	19,76	6,59
	Ufficio 8	21,27	7,09
	Ingresso	21,56	-
Ovest	Corridoio 1	9,79	2,45
	Ufficio 1	18,77	-
	Ufficio 2	21,56	-
Nord	Ufficio 1	15,34	3,84
	Ufficio 3	14,14	3,54
	Bagno	13,03	3,26
	Scala	17,24	4,31
	Ufficio 5	21,08	5,27
	Ufficio 7	22,68	5,67

Tabella 9 Dettaglio dell'involucro del primo piano

Orientamento	Locale	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]
Est	Corridoio 2	9,79	2,45
	Ufficio 9	18,77	-
	Sala server	21,56	-
Sud	Sala pranzo	27,64	9,21
	Bagno 4	12,21	4,07
	Ufficio 12	16,17	5,39
	Ufficio 11	19,76	6,59
	Sala Server	21,27	7,09
Ovest	Corridoio 2	9,79	2,45
	Ufficio 14	18,77	-
	Sala pranzo	21,56	-
Nord	Ufficio 14	15,34	3,84
	Ufficio 13	14,14	3,54
	Bagno 3	13,03	3,26
	Scala 2	17,24	4,31
	Ufficio 10	21,08	5,27
	Ufficio 7	22,68	5,67

1.2 Descrizione del caso studio: Layout d'impianto termico

L'impianto termico utilizzato in entrambe le configurazioni è costituito da due unità esterne VRF (*Variable Refrigerant Flow*), 25 unità interne ad espansione diretta e un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC).

Per ottenere migliori prestazioni energetiche l'impianto di VMC è corredato di un recuperatore di calore aria-aria.

Il fluido termovettore R410A è distribuito ai terminali installati presso ciascun locale da climatizzare secondo lo schema indicato in figura 7. La tipologia di terminali impiegata è di seguito elencata:

- n. 12 unità interne (ufficio 1-2-4-5-10-12-14, bagno 1-2, scala 1-2, ingresso) aventi una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 2,2 kW ed a 2,5 kW;
- n. 4 unità interne (ufficio 3-13, bagno 3-4) aventi una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 1,5 kW ed a 1,7 kW;
- n. 7 unità interne (ufficio 6-7-8-9-11, corridoio 1-2) dalla potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 2,8 kW ed a 3,2 kW;
- n. 2 unità interne (ufficio 15, sala pranzo) aventi una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 3,6 kW ed a 4,2 kW.

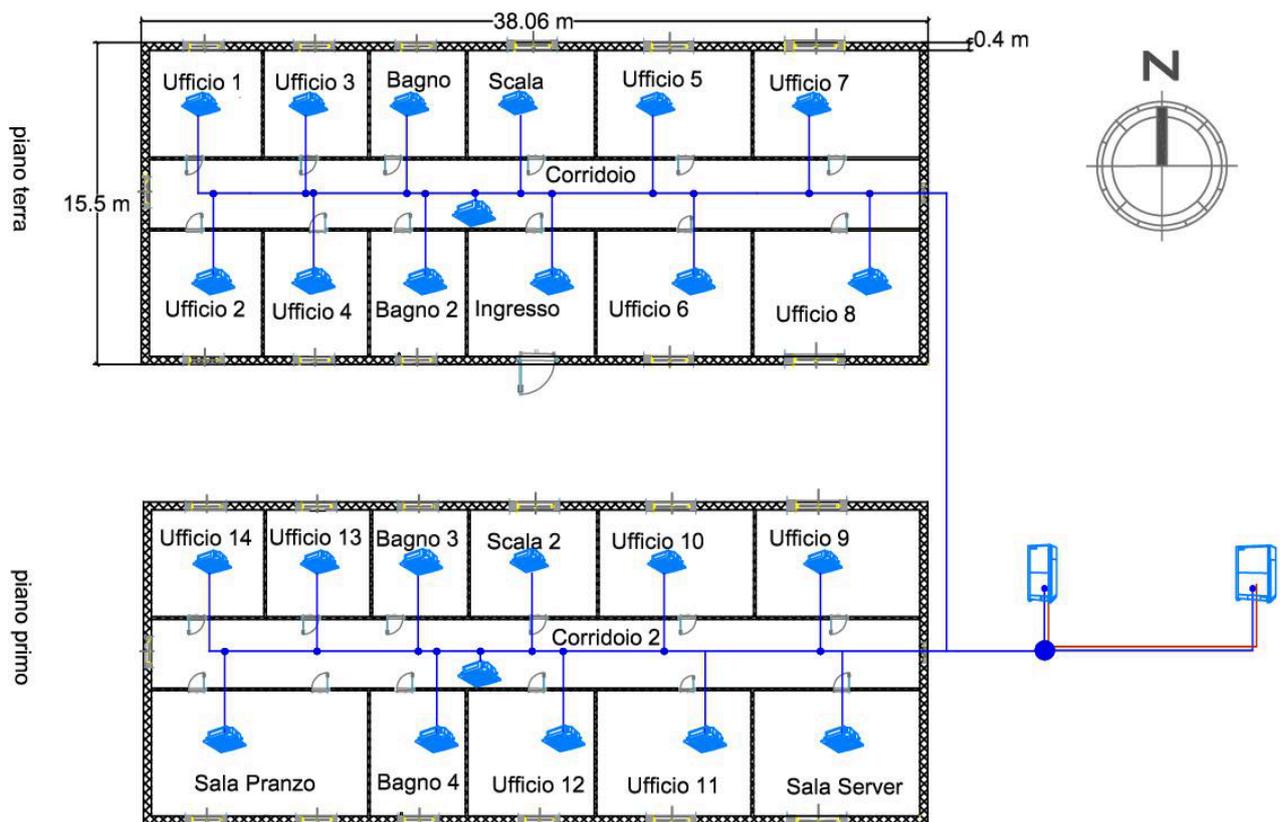


Figura 7 Impianto di climatizzazione piani terra e primo

Le tabelle 10 e 11 riportano rispettivamente i dati tecnici delle due macchine VRF utilizzate nell'impianto.

Tabella 10 Dati tecnici macchina VRF 1

Modalità raffrescamento	
Temperatura interna DB	27 °C
Temperatura interna WB	19 °C
Temperatura esterna DB	35 °C
Capacità di raffrescamento nominale	28 kW
EER Nominale	3,06
Modalità riscaldamento	
Temperatura interna DB	20 °C
Temperatura esterna DB	7 °C
Temperatura esterna WB	6 °C
Capacità di riscaldamento nominale	31,5 kW
COP Nominale	4,76

Tabella 11 Dati tecnici macchina VRF 2

Modalità raffrescamento	
Temperatura interna DB	27 °C
Temperatura interna WB	19 °C
Temperatura esterna DB	35 °C
Capacità di raffrescamento nominale	33,5 kW
EER Nominale	2,82
Modalità riscaldamento	
Temperatura interna DB	20 °C
Temperatura esterna DB	7 °C
Temperatura esterna WB	6 °C
Capacità di riscaldamento nominale	37,5 kW
COP Nominale	4,73

La quantità di portata di fluido refrigerante proveniente dai sistemi VRF e distribuita nei terminali varia in funzione della temperatura presente all'interno di ogni zona termica dell'edificio. Il sistema di controllo adottato è funzione del valore della temperatura di ogni ambiente e del profilo di occupazione tipico di un edificio non residenziale.

Contestualmente, il sistema di ventilazione meccanica controllata garantisce i ricambi d'aria minimi richiesti per assicurare i limiti normativi in materia di qualità dell'aria, prevedendo dei sistemi di estrazione per i locali destinati a servizi igienici e corridoi e di immissione per tutti gli altri locali.

Analogamente al sistema di controllo del VRF, il sistema di controllo della VMC è funzione esclusivamente del profilo di occupazione.

Le portate di aria minime per garantire un adeguato ricambio sono state calcolate facendo ricorso al Prospetto III della norma UNI 10339/1995[6] che per i locali destinati ad uffici prevede una portata di aria esterna pari ad $\frac{11 \times 10^{-3} m^3}{secondo \times persona}$.

È stato inoltre effettuato il dimensionamento dei canali di distribuzione dell'aria che devono servire i singoli locali, facendo ricorso al metodo a perdita di carico costante con riferimento all'utilizzo di canali circolari. Si faccia riferimento alla tabella 12 per ulteriori dettagli.

Tabella 12 Dimensionamento dei canali di distribuzione dell'aria

DESCRIZIONE TRATTO	Portata [m ³ /h]	Velocità [m/s]	Sezione condotto		Lunghezza del tratto [m]	ΔP continua [Pa/m]	Perdite		
			[m ²]	[mm]			concentrate [Pa]	L x R [Pa]	ΔP [Pa]
PRESA ARIA									
ESTERNA	2.800	3,89	0,20		1,0	0,38	3,64	0,38	4,03
A – B	2.800	3,96	0,20	500	3,0	0,34	3,78	1,02	4,80
B – C	2.800	3,96	0,20	500	1,5	0,34	12,28	0,51	12,79
C – D	1.400	3,09	0,13	400	4,0	0,28	2,31	1,14	3,44
D – E	1.176	2,60	0,13	400	5,0	0,21	1,63	1,04	2,66
E – F	954	2,75	0,10	350	4,0	0,27	1,83	1,08	2,91
F – G	641	2,52	0,07	300	11,0	0,28	1,53	3,06	4,59
G – H	340	1,92	0,05	250	7,5	0,21	3,12	1,61	4,73
C – I	1.400	3,09	0,13	400	4,0	0,28	0,89	1,14	2,03
I – L	1.400	3,09	0,13	400	4,0	0,28	2,31	1,14	3,44
L – M	1.053	2,33	0,13	400	5,5	0,17	0,65	0,93	1,58
M – N	952	2,75	0,10	350	11,5	0,27	1,82	3,11	4,93
N – O	680	2,67	0,07	300	7,5	0,31	1,72	2,33	4,05
O – P	347	1,96	0,05	250	7,5	0,22	3,25	1,67	4,92
Perdita Carico Filtri UTA e recuperatore di calore [Pa]									100
Perdita carico Bocchetta [Pa]									20
Perdita complessiva tratto più sfavorito [Pa]									156,2
Pressione da garantire a monte della bocchetta [Pa]									150
Prevalenza ventilatore [Pa]									306,2

Dal punto di vista degli impianti di generazione alimentati da fonti rinnovabili si è ipotizzato l'impiego di un sistema fotovoltaico avente le caratteristiche riportate in tabella 13.

Tabella 13 Sintesi delle principali caratteristiche dell'impianto fotovoltaico

Dati	Quantità	Unità
N° Moduli fotovoltaici	88	-
Potenza elettrica singolo modulo	300	W
Potenza totale sistema fotovoltaico	26.400	W
Area	162	m ²
Generazione	38.372	kWh/anno

Inoltre, si prevede l'ulteriore differenziazione tra le due configurazioni con riferimento all'utilizzo di sistemi di accumulo elettrici:

- Configurazione 1: presenza di un sistema di accumulo dell'energia elettrica da 30 kWh nel layout d'impianto;
- Configurazione 2: assenza del sistema di accumulo dell'energia elettrica.

2 Modellizzazione Geometrica

La modellizzazione geometrica dell'edificio campione è stata realizzata in ambiente Google Sketchup tramite l'ausilio del plugin Euclid. La geometria così definita è stata importata in ambiente TRNSYS Simulation Studio per la caratterizzazione termofisica dell'edificio e la modellizzazione degli impianti termici. Si riportano nel seguito i dettagli estrapolati direttamente in ambiente Google Sketchup di ciascuna zona termica del modello geometrico (figure 8 – 32).

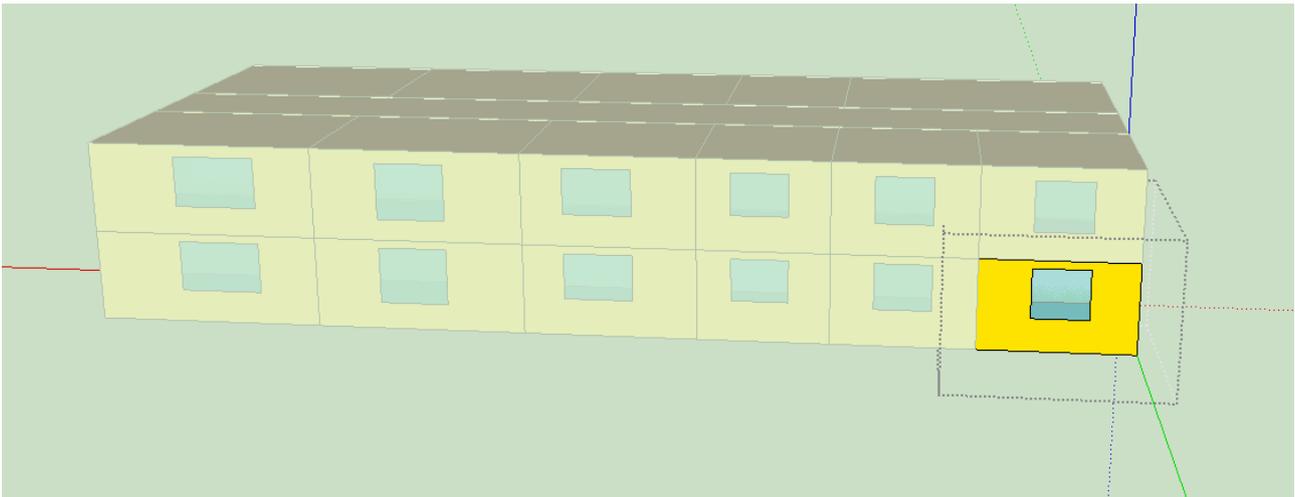


Figura 8 Zona termica 1 (Ufficio 1)

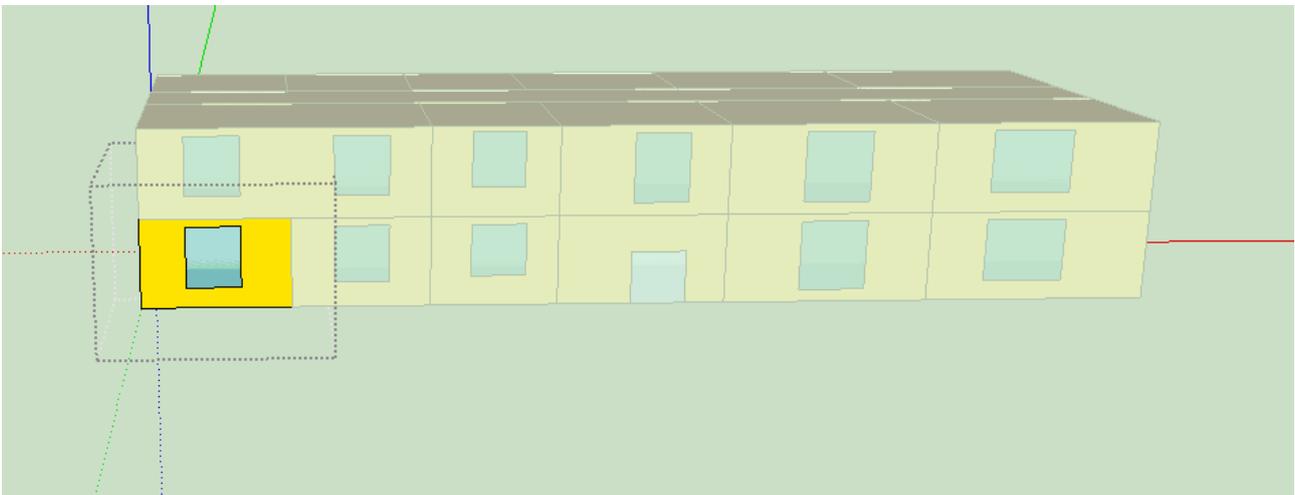


Figura 9 Zona termica 2 (Ufficio 2)

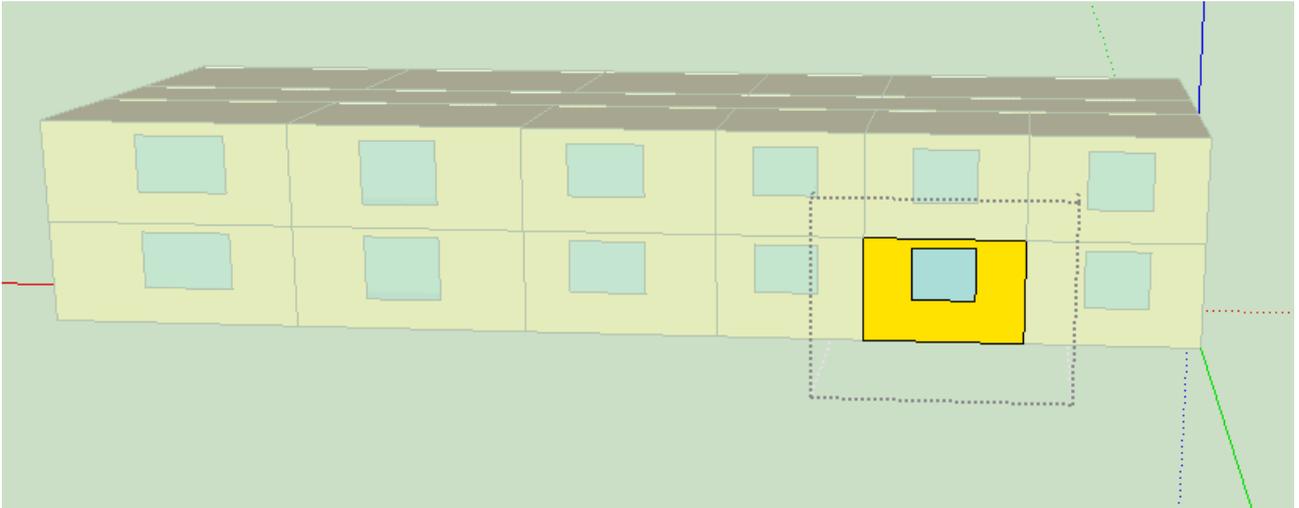


Figura 10 Zona termica 3 (Ufficio 3)

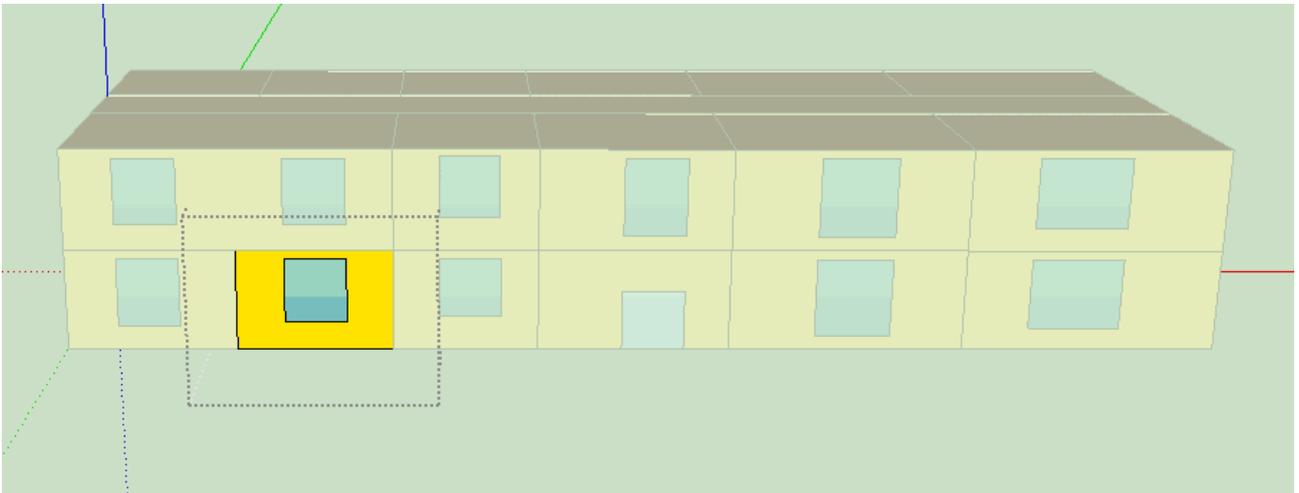


Figura 11 Zona termica 4 (Ufficio 4)

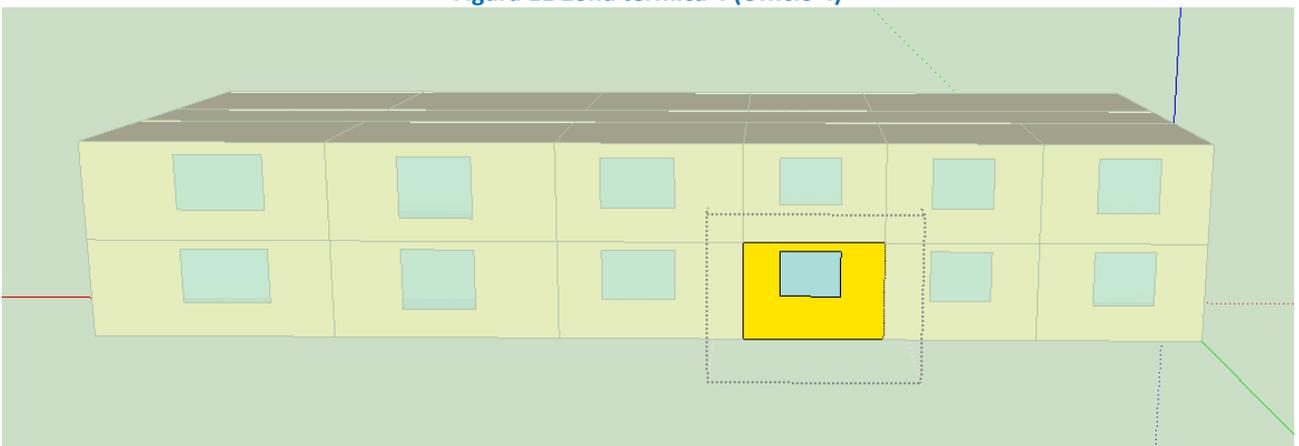


Figura 12 Zona termica 5 (Bagno)

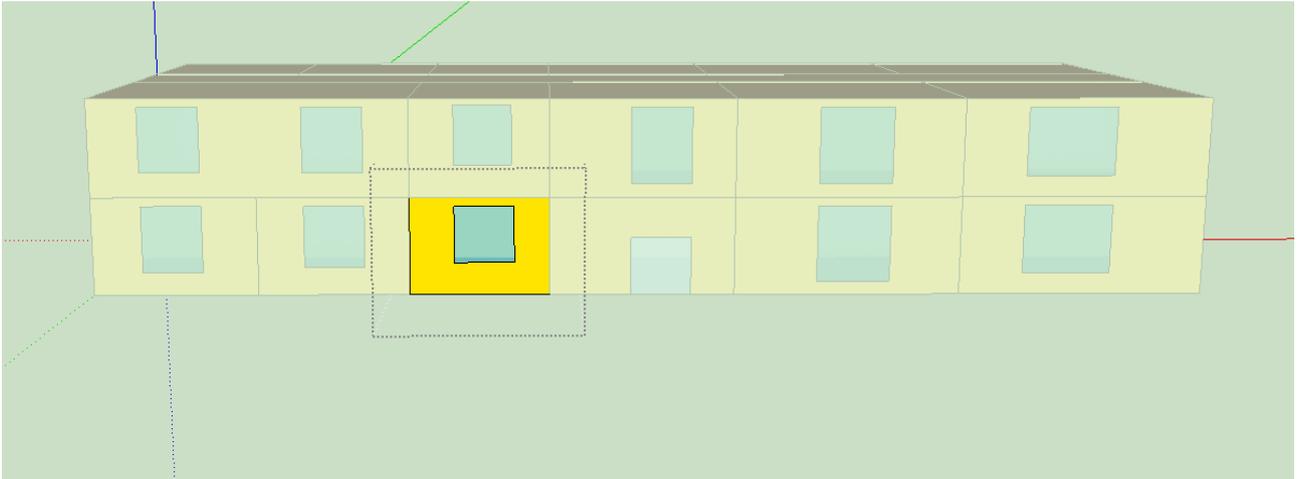


Figura 13 Zona termica 6 (Bagno 2)

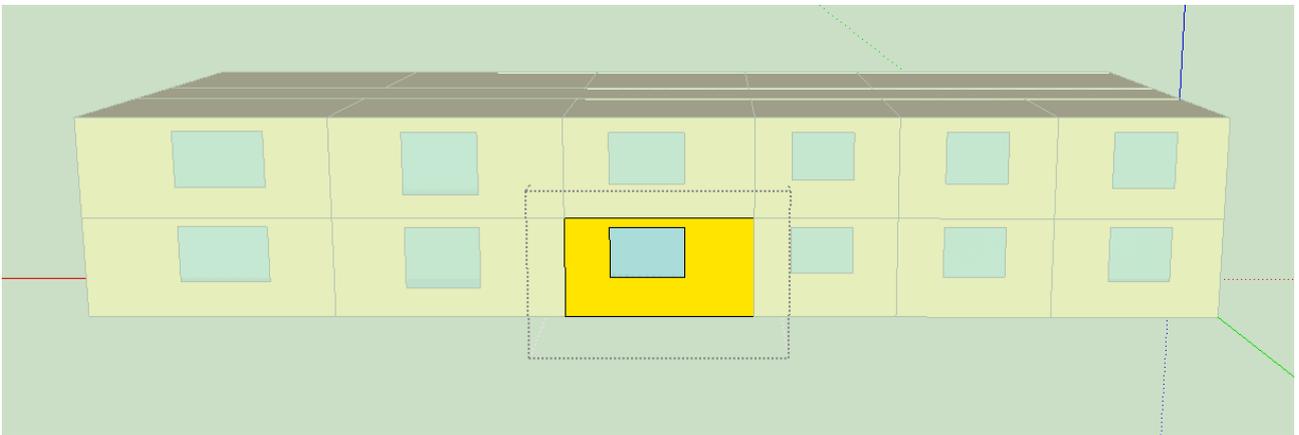


Figura 14 Zona termica 7 (Scala)

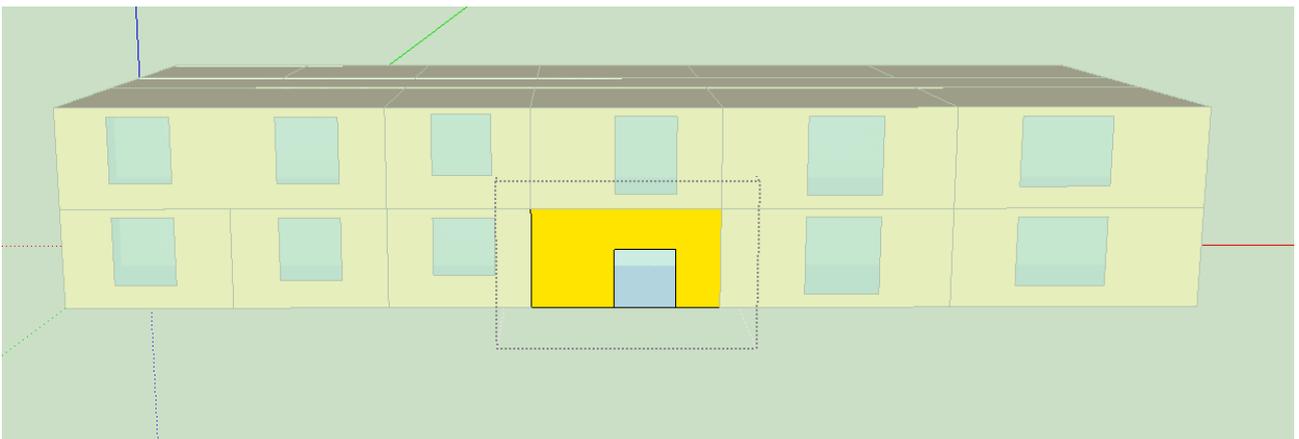


Figura 15 Zona termica 8 (Ingresso)

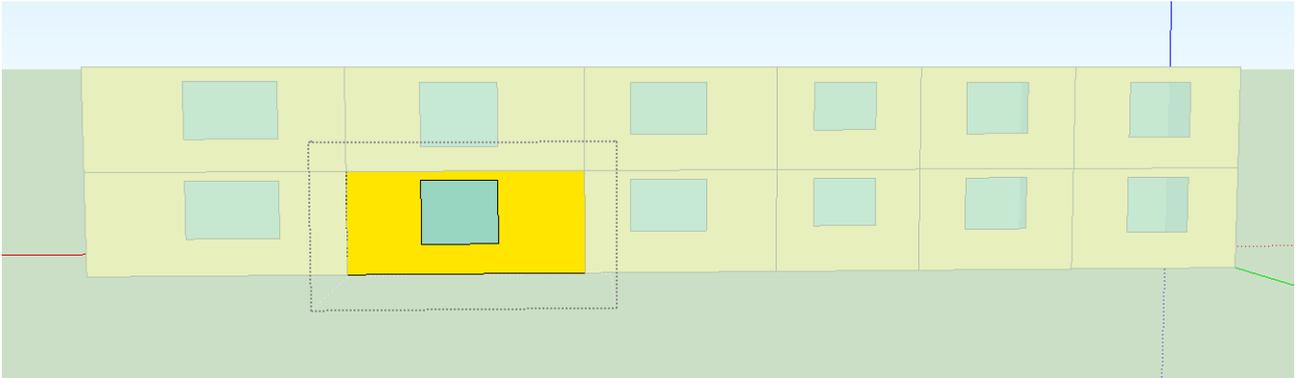


Figura 16 Zona termica 9 (Ufficio 5)



Figura 17 Zona termica 10 (Ufficio 6)

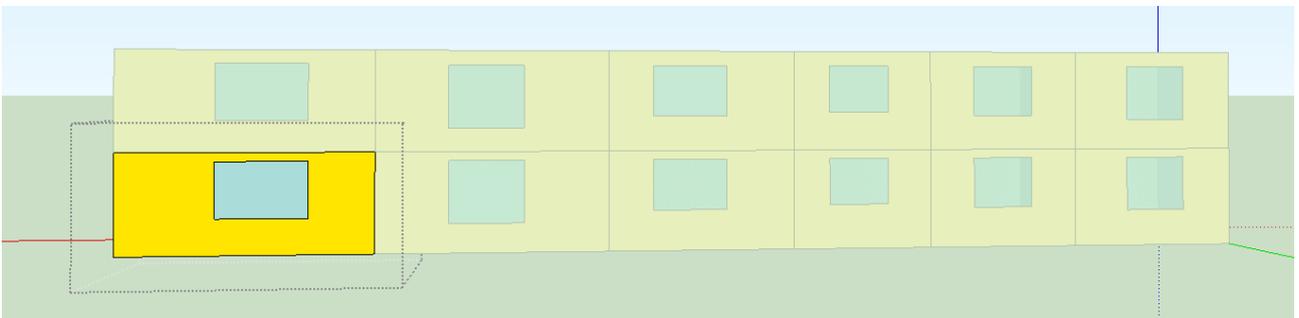


Figura 18 Zona termica 11 (Ufficio 7)



Figura 19 Zona termica 12 (Ufficio 8)

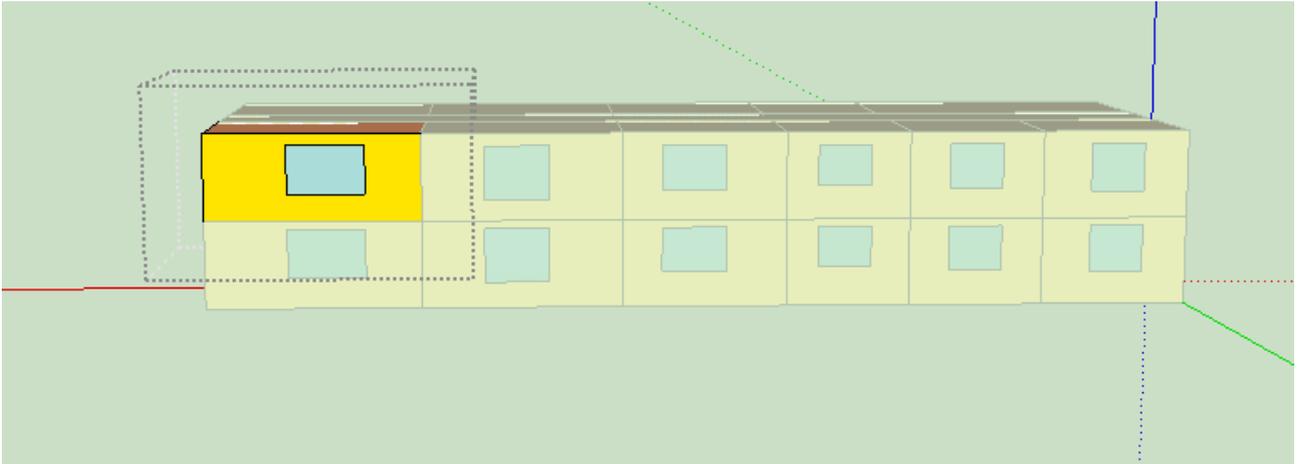


Figura 20 Zona termica 13 (Ufficio 9)

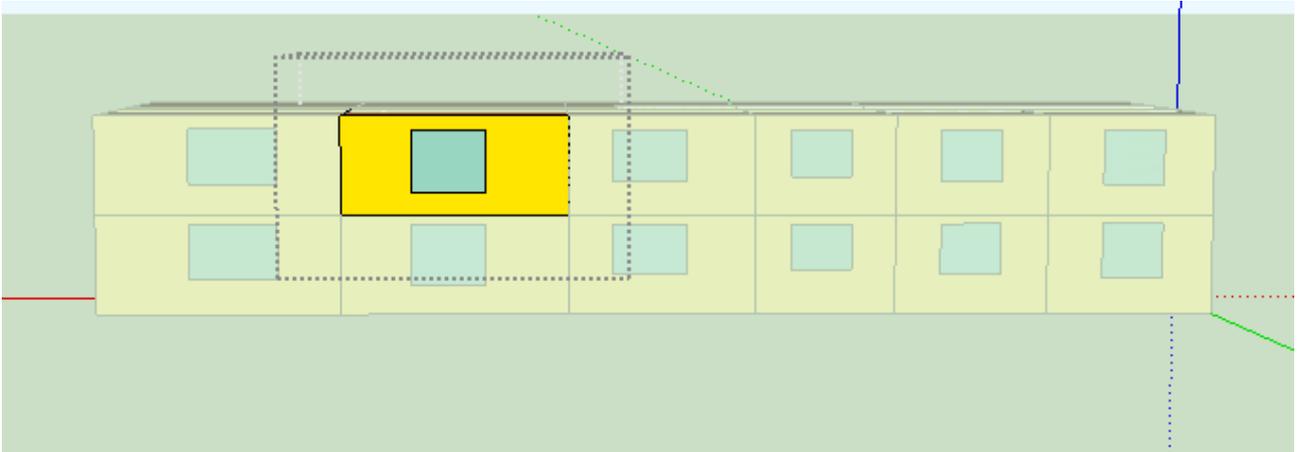


Figura 21 Zona termica 14 (Ufficio 10)

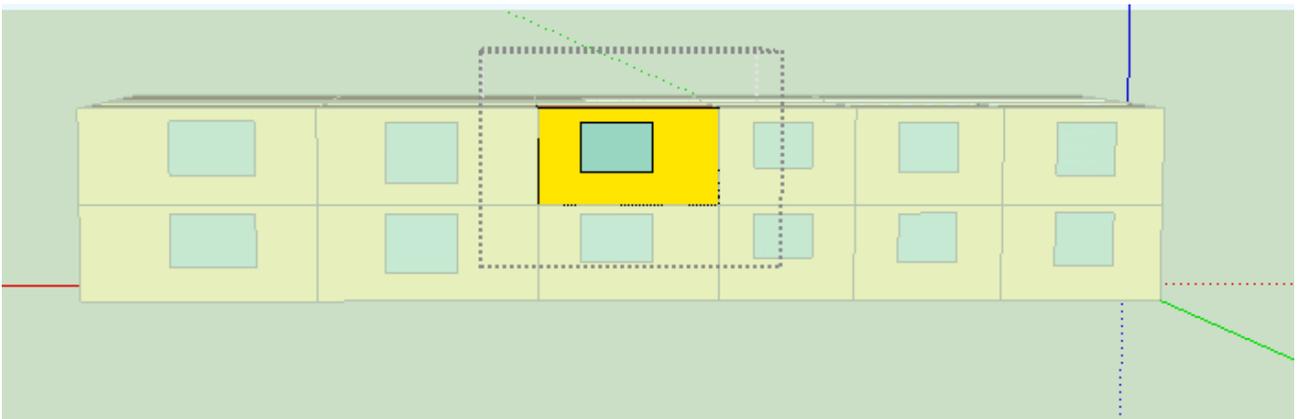


Figura 22 Zona termica 15 (Scala 2)

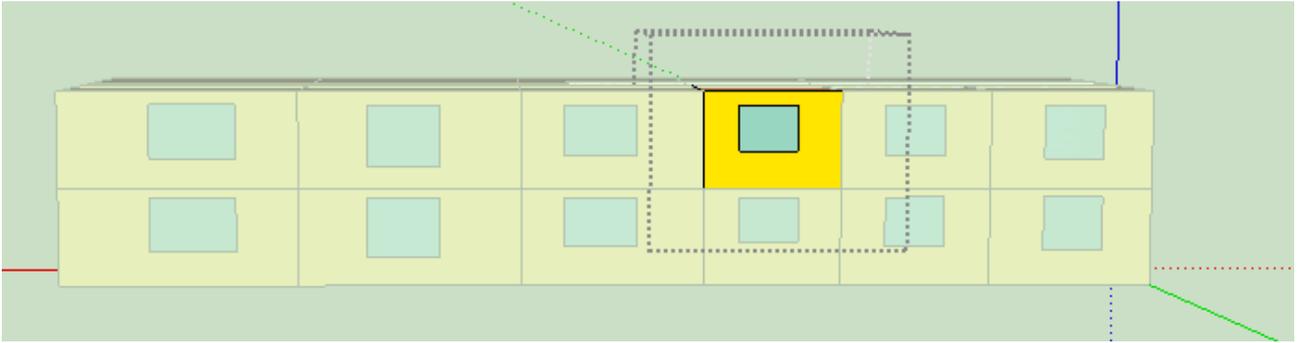


Figura 23 Zona termica 16 (Bagno 3)



Figura 24 Zona termica 17 (Ufficio 13)



Figura 25 Zona termica 18 (Ufficio 14)

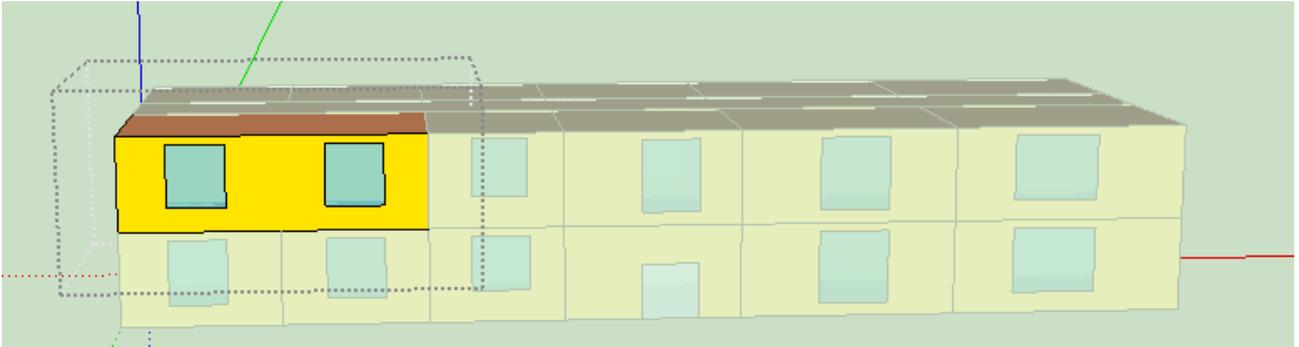


Figura 26 Zona termica 19 (Sala pranzo)

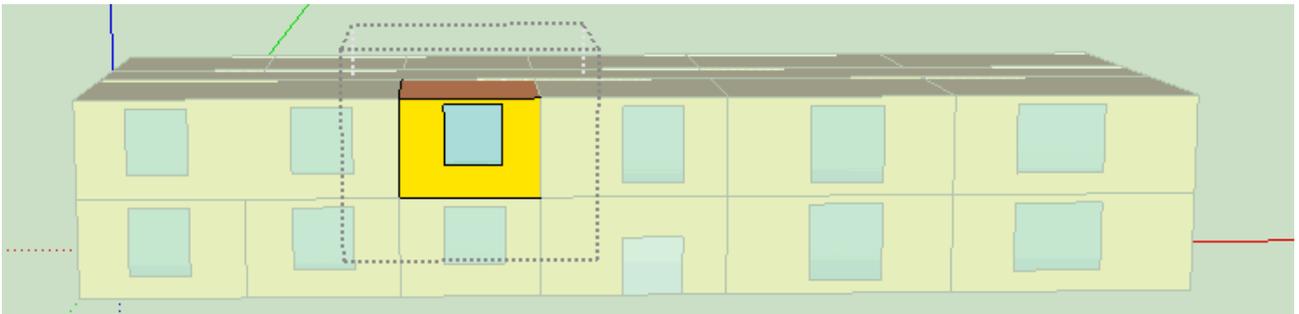


Figura 27 Zona termica 20 (Bagno 4)

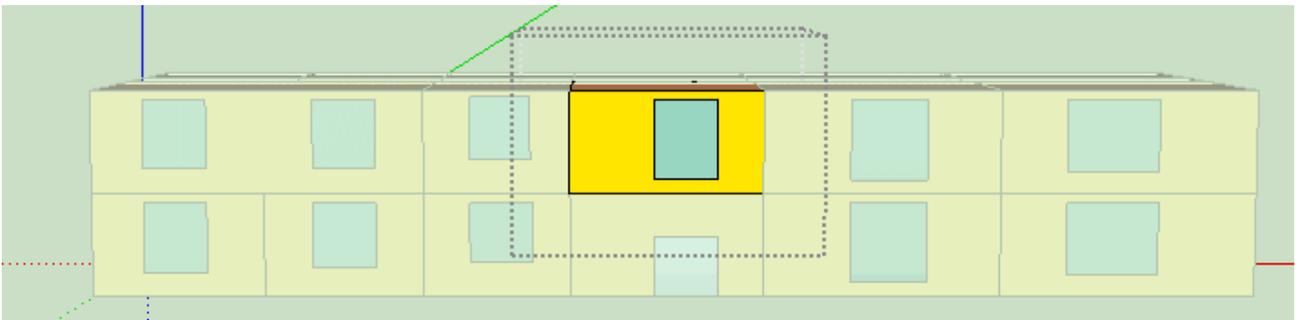


Figura 28 Zona termica 21 (Ufficio 12)

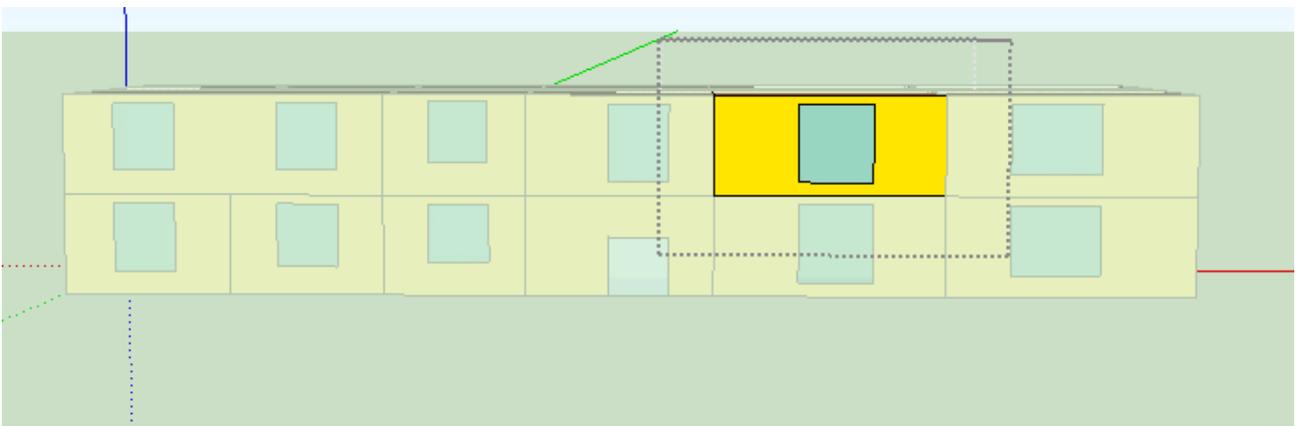


Figura 29 Zona termica 22 (Ufficio 11)

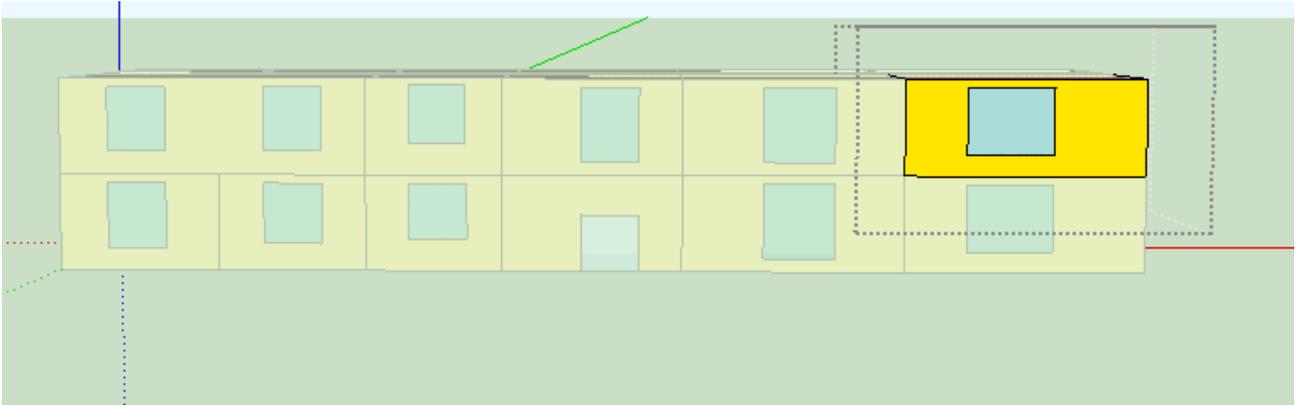


Figura 30 Zona termica 23 (Sala Server)

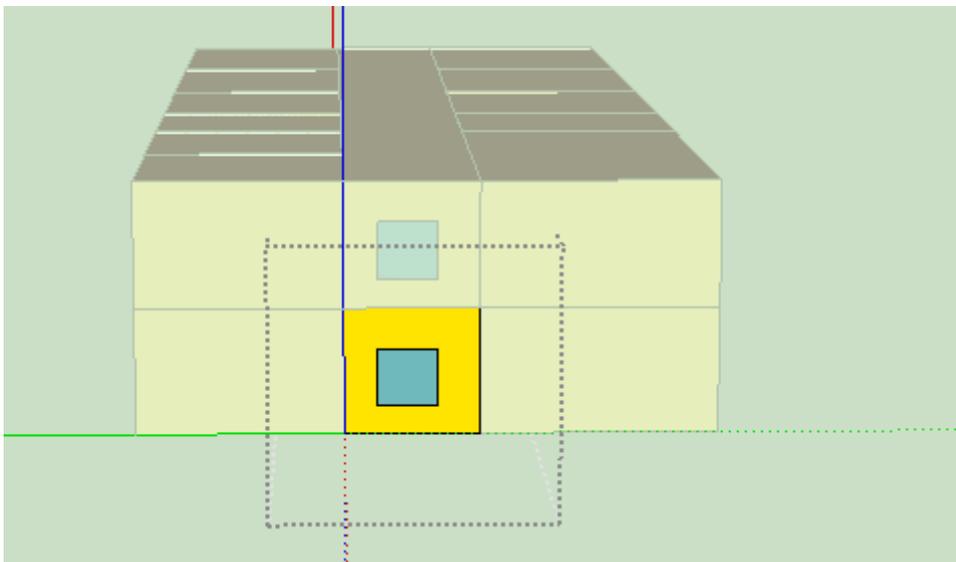


Figura 31 Zona termica 24 (Corridoio)

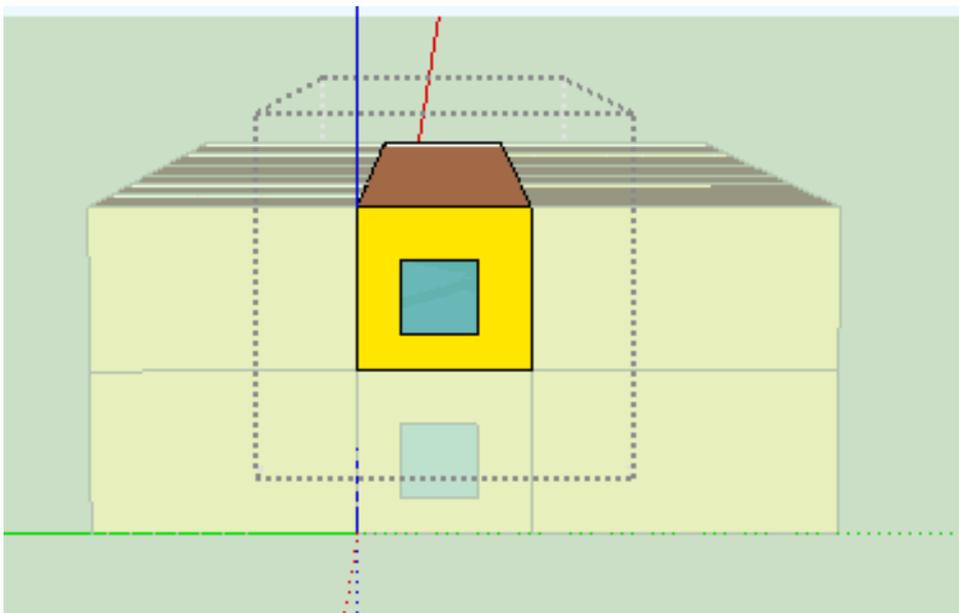


Figura 32 Zona termica 25 (Corridoio 2)

2.1 Ulteriori assunzioni di modellizzazione e simulazione

Si riportano di seguito le principali assunzioni di modellizzazione e simulazione utilizzate per lo studio in questione:

- Si è operato con un *timestep* di simulazione orario;
- l'efficienza media delle macchine integrate nei sistemi VRF è considerata costante nel corso dell'anno, a causa della limitata disponibilità di informazioni dettagliate sulla variabilità dell'assorbimento di energia elettrica in funzione delle condizioni climatiche esterne;
- l'occupazione nei due piani è pari a due occupanti per ufficio. Si sono adottati dei profili di utilizzo legati agli orari tipici di occupazione di un edificio non-residenziale (dalle 8 alle 18 dal lunedì al venerdì);
- la densità di potenza elettrica per illuminazione e per apparecchiature elettriche installate per ciascuna zona termica è variabile in funzione della destinazione d'uso della stessa. La densità di potenza per apparecchiature elettriche raggiunge un massimo di 14 W/m^2 e per l'illuminazione non supera i 6 W/m^2 ;
- l'accensione e lo spegnimento dei corpi illuminanti e delle apparecchiature è subordinata alla presenza degli occupanti, è soggetta a variabilità oraria e stagionale ed è determinata dalla destinazione d'uso degli ambienti analizzati;
- la gestione dell'impianto termico VRF- UTA è subordinata alla presenza degli occupanti; pertanto, l'impianto termico è attivo per dieci ore giornaliere dal lunedì al venerdì;
- si è ipotizzata la presenza di termostati per ogni zona termica, al fine di modulare opportunamente la portata in ingresso alle unità interne in dipendenza dalla temperatura dell'aria di ciascuna zona;
- per la simulazione termofisica in regime dinamico si sono utilizzati dati climatici UNI TS 10349 [7].

3 Risultati

La presente sezione sintetizza i principali risultati emersi dallo studio.

È stata analizzata la generazione di energia in sito, l'interazione con il carico durante la fase d'uso dell'edificio e verificato se le due configurazioni soddisfino la definizione di Net Zero Energy Building fornita da NRE/L DOE[8] e dal gruppo di IEA Task 40/Annex 52 Towards "Net Zero Energy Solar Buildings" [9].

3.1 Configurazione 1: Consumi di energia elettrica

La figura 33 riporta i consumi di energia elettrica con dettaglio mensile per l'edificio della configurazione 1. In particolare, sono rappresentati anche i singoli contributi dovuti ad apparecchiature elettriche, VRF per riscaldamento/raffrescamento, illuminazione, ausiliari e unità trattamento aria.

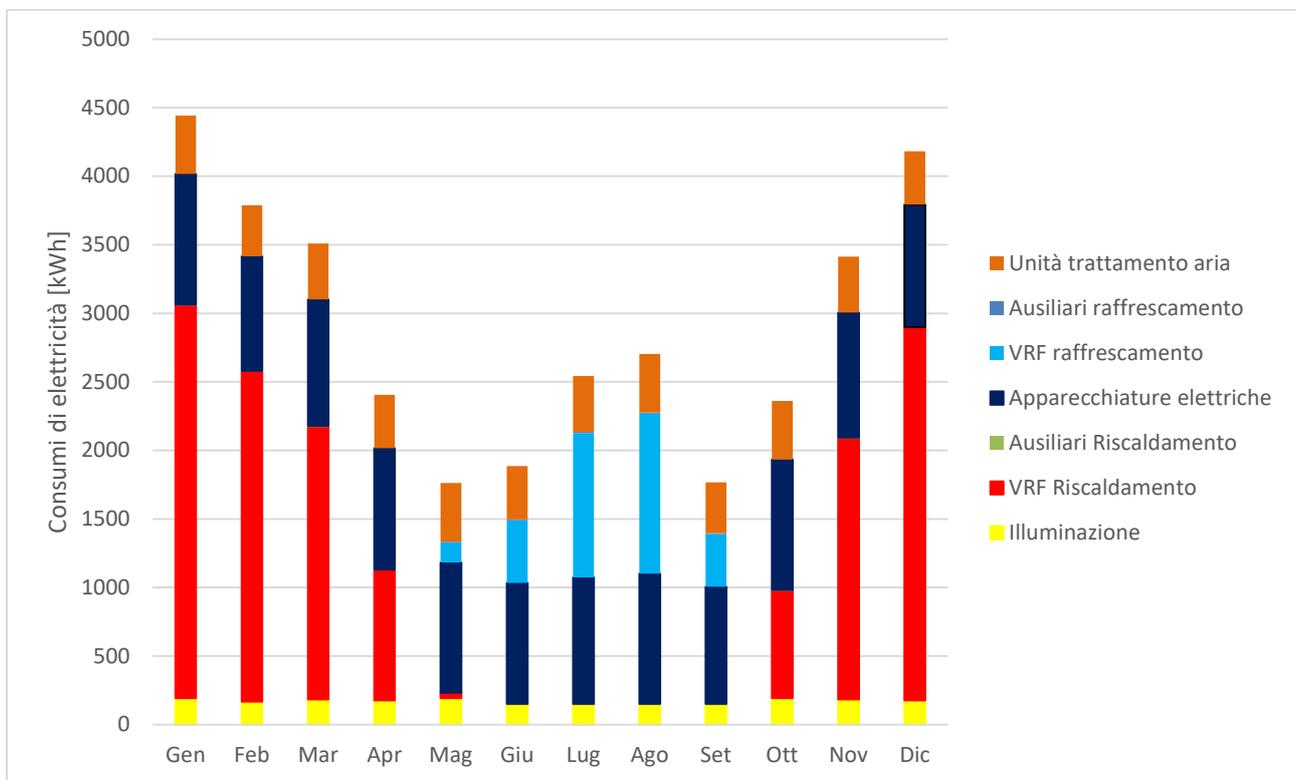


Figura 33 Consumi di elettricità dell'edificio, dettaglio mensile – Configurazione 1 [kWh]

La distribuzione percentuale dei consumi elettrici è riportata in figura 34. In particolare, le apparecchiature elettriche incidono per circa il 31% dei consumi di elettricità complessivi, l'illuminazione per il 6%, gli ausiliari per lo 0,25%, il VRF in modalità riscaldamento per circa il 39%, il VRF in modalità raffreddamento per il 9% e l'UTA per il 14%.

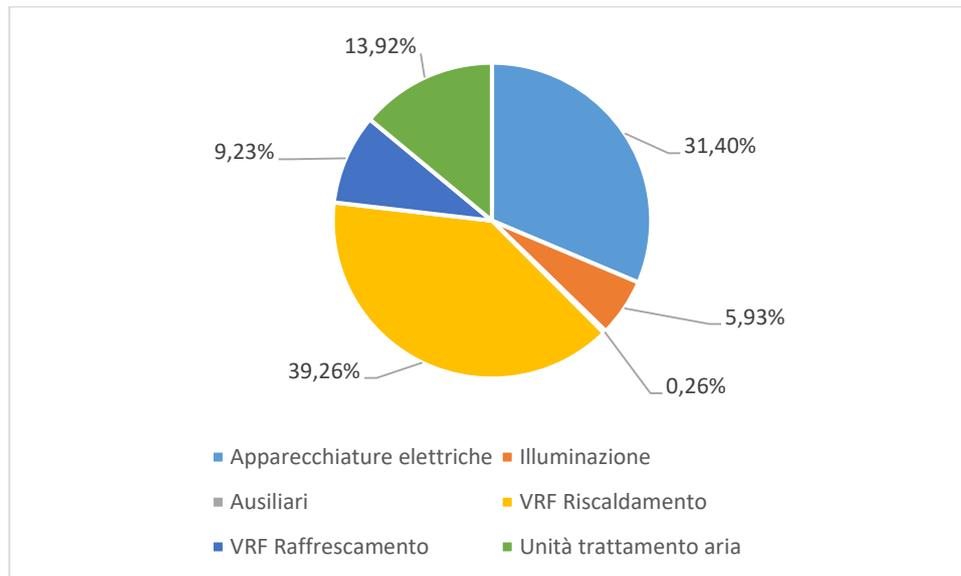


Figura 34 Consumi di elettricità dell'edificio, Configurazione 1

In tabella 14, sono riportati invece i valori annuali dei consumi energetici complessivi e specifici.

Tabella 14 Dettaglio dei consumi complessivi per elettricità-Configurazione 1

Consumi di elettricità	kWh/anno	kWh/ (anno m ²)
Apparecchiature elettriche	10.915,17	9,28
Illuminazione	2.061,60	1,75
Ausiliari	87,85	0,07
VRF Riscaldamento	13.647,44	11,60
VRF Raffrescamento	3.209,10	2,73
UTA	4.838,94	4,11
Totale	34.760,10	29,56

3.2 Confronto tra Configurazione 1 e 2: consumi e generazione di energia

La tabella 15 riporta i principali risultati ottenuti per le due configurazioni in termini di consumi energetici annuali.

Tabella 15 Dettaglio dei consumi complessivi per elettricità – confronto tra Configurazione 1 e 2

Consumi di elettricità	Configurazione 1		Configurazione 2	
	kWh/annuo	kWh/ (anno m ²)	kWh/annuo	kWh/ (anno m ²)
Apparecchiature elettriche	10.915,17	9,28	10.915,17	9,28
Illuminazione	2.061,60	1,75	2.061,60	1,75
Ausiliari	87,85	0,07	88,20	0,08
VRF Riscaldamento	13.647,44	11,60	13.418,12	11,41
VRF Raffrescamento	3.209,10	2,73	3.239,13	2,75
UTA	4.838,94	4,11	4.838,94	4,11
Totale	34.760,10	29,56	34.561,16	29,39

La generazione di energia elettrica da fotovoltaico per entrambi le configurazioni è pari a 38.372 kWh/anno ed è riportata con dettaglio mensile in figura 35.

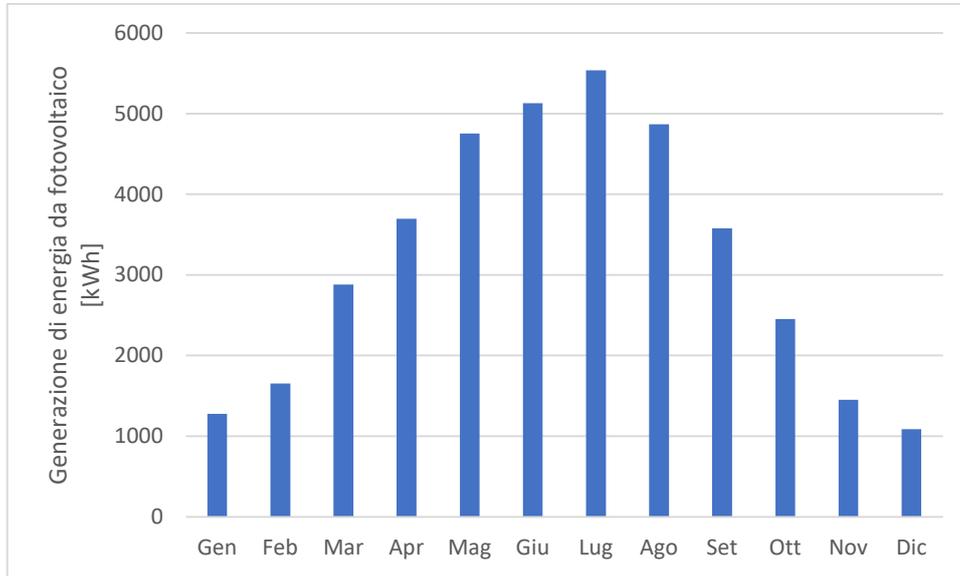


Figura 35 Generazione di energia da sistema fotovoltaico: dettaglio mensile

3.3 Load matching e interazione con la rete: Configurazione 1

La configurazione 1 ha richiesto un'analisi del *load matching* e dell'interazione con la rete. In particolare, ci si è avvalsi dell'ausilio dei seguenti indicatori, load cover factor (γ_{load}) e loss of load probability (LOLP) di seguito definiti:

$$\gamma_{load} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min[g(t) - S(t) - \delta(t), l(t)] dt}{\int_{t_1}^{t_2} l(t) dt} \quad (1)$$

$$LOLP = \frac{\int_{t_1}^{t_2} dt_{l(t) > (g(t) - S(t) - \delta(t))}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Dove:

L'indicatore *load cover factor* - γ_{load} rappresenta la percentuale di domanda elettrica coperta dalla generazione di elettricità in sito;

L'indicatore *loss of load probability* - *LOLP* identifica la percentuale di tempo in cui la generazione locale di energia elettrica non copre la domanda dell'edificio;

$g(t)$: è la generazione di energia in sito;

$S(t)$: è il bilancio di energia del sistema di accumulo energetico;

$\delta(t)$: rappresenta le perdite energetiche nel sistema;

$l(t)$: rappresenta i consumi energetici istantanei;

t_1 e t_2 : rappresentano il tempo di analisi.

La figura 36 riporta un'analisi di sensibilità sul dimensionamento del sistema di accumulo elettrico.

Il valore di 0 kWh coincide con la configurazione 2 (senza accumulo elettrico): si evidenzia per questo caso un γ_{load} pari a circa il 40% e un *LOLP* pari a circa il 70%.

La scelta del valore nella configurazione 1 della capacità del sistema di accumulo pari a 30 kWh scaturisce dall'analisi del trend dei due indicatori selezionati al variare della capacità del sistema (vedi figura 36).

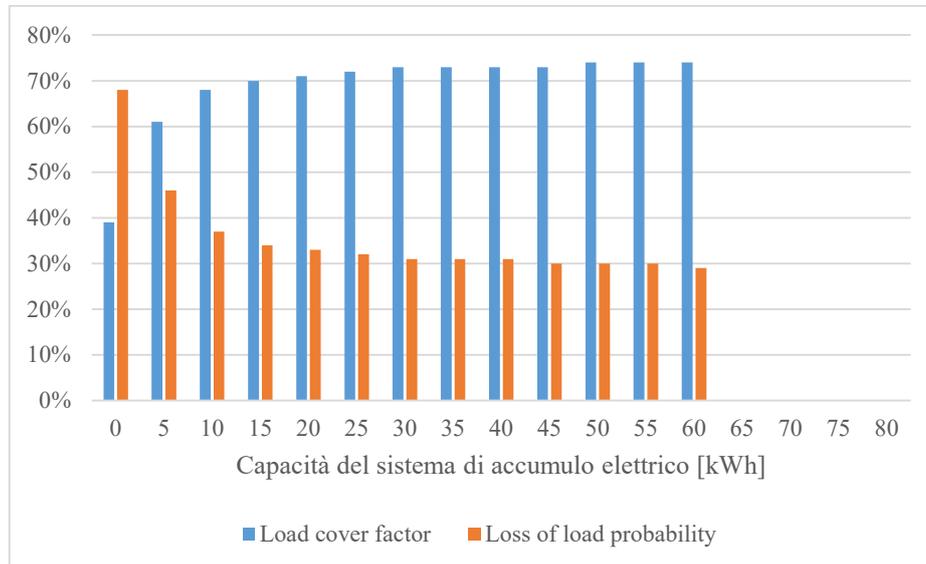


Figura 36 Load cover factor e loss of load probability per la configurazione 1 – Analisi di sensibilità sulla taglia dello scenario di accumulo

3.4 Sintesi configurazione 1 e 2

Nella tabella 16 si riporta una sintesi dei principali risultati in termini di generazione di energia e consumi.

Tabella 16 Sintesi dei risultati energetici delle configurazioni 1 e 2

	Configurazione 1 [kWh]	Configurazione 2[kWh]
Generazione elettricità	38.372,81	38.372,81
Consumi elettricità	34.760,10	34.561,16
Import	13.975,70	16.599,09
Export	17.311,45	20.410,38
Auto-consumo da PV	17.974,61	17.958,64
Auto-consumo da sistema di accumulo	2.809,79	-

L'edificio genera più energia di quanta ne consumi e pertanto verifica la definizione di Net Zero Energy Building (Eq. 3 – Bilancio Load – Generation), sviluppata nell'ambito del gruppo di lavoro IEA SHC Task 40/EBC Annex 52 joint program titled "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" di seguito riportata:

$$Bilancio = \sum_{t=1}^{t=2} G(t) wg - L(t) wl$$

(3)

Dove:

t_1 e t_2 rappresentano gli estremi di calcolo per il periodo di interesse;

$G(t)$ è la generazione complessiva di energia in sito;

wg è il fattore di conversione in energia primaria;

$L(t)$ rappresenta i consumi di energia in sito;

wl è il fattore di conversione in energia primaria.

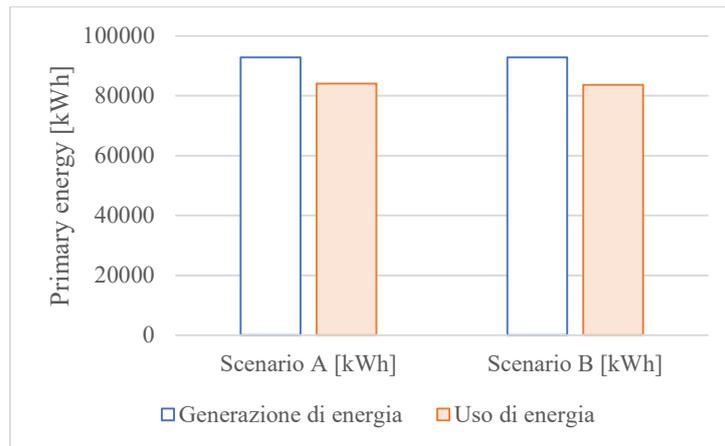


Figura 37 Bilancio di energia Load – generation

La figura 37 mostra i risultati ottenuti impiegando w_g e w_l pari in entrambi i casi a 2,42. In entrambe le configurazioni i valori di generazione sono maggiori rispetto ai valori dei consumi di energia. Se, viceversa, si fosse adoperata la convenzione del bilancio *delivered – exported*, adottata da NREL e DOE, la formula da impiegare sarebbe la seguente:

$$Bilancio = \sum_{t=1}^{t=2} E_{del}(t)r_{rdel} - E_{exp}(t)r_{exp}$$

(4)

Dove:

$E_{del}(t)$ rappresenta l'energia importata per ciascun vettore energetico;

r_{del} il fattore di conversione in energia primaria;

$E_{exp}(t)$ rappresenta l'energia esportata e generata da fonti rinnovabili;

r_{exp} è il fattore di conversione in energia primaria.

In accordo all'impiego della eq. (4) si sono ottenuti i risultati riportati in figura 38. Anche in questo caso il target nZEB è stato raggiunto [10] [11] .

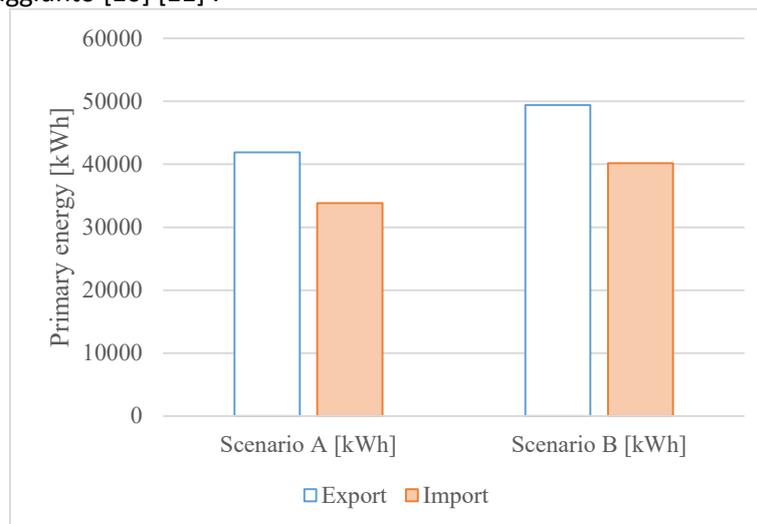


Figura 38 Bilancio di energia import – export

4 Life Cycle Assessment

La metodologia LCA è stata applicata in accordo alle norme della serie ISO 14040[12] e ISO 14044[13] e con riferimento alle norme UNI EN 15978: 2011[14] e UNI EN 15804:2021[15].

4.1 Definizione dell'obiettivo

4.1.1 Obiettivi dello studio e descrizione del sistema di prodotto

Obiettivo della ricerca è quello di valutare gli impatti energetici e le emissioni di gas climalteranti di un edificio ad uso ufficio ad energia netta zero (Net Zero Energy Building – nZEB) nella fase d'uso, considerando due differenti configurazioni:

- Configurazione 1: edificio ad uso ufficio con isolamento termico realizzato con polistirene espanso estruso (XPS); sistema impiantistico costituito due unità esterne Variable Refrigerant Flow (VRF), 25 unità interne ad espansione diretta, un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMV), un impianto fotovoltaico connesso alla rete e integrato con un accumulo elettrico;
- Configurazione 2: edificio ad uso ufficio con isolamento termico realizzato con fibre di cellulosa (FC); sistema impiantistico costituito da due unità esterne VRF, 25 unità interne ad espansione diretta, un sistema di ventilazione meccanica controllata e un impianto fotovoltaico connesso alla rete.

L'immobile esaminato è un edificio su due elevazioni sito a Roma.

Il piano terra comprende l'androne di ingresso, il corridoio, otto uffici, due bagni e la scala. Il primo piano invece comprende sei uffici, due bagni, un corridoio, una sala pranzo e una sala server.

Il sistema di prodotto è costituito dai componenti dell'involucro edilizio e dai componenti d'impianto integrati necessari all'edificio in esame per raggiungere il target di nZEB nella fase d'uso. Tali componenti sono elencati di seguito:

Componenti d'involucro:

- Aperture finestrate;
- Copertura esterna (tetto);
- Pareti perimetrali verticali;
- Pareti divisorie interne;
- Pavimento di interpiano;
- Pavimento contro terra;
- Porte interne;
- Porta esterna.

Nel proseguo dell'analisi l'impiego di due differenti isolanti nelle due configurazioni sarà indicato come segue:

- Scenario XPS: impiego di XPS come materiale isolante;
- Scenario FC: impiego di FC come materiale isolante.

Il riferimento alle due differenti configurazioni impiantistiche sarà indicato come segue:

- Scenario cAE: impianto fotovoltaico connesso alla rete e ad un sistema di accumulo elettrico;
- Scenario sAE: impianto fotovoltaico connesso alla rete senza la presenza di un sistema di accumulo elettrico.

Componenti d'impianto

- Impianto fotovoltaico;
- Sistema di accumulo elettrico;
- Unità trattamento aria (UTA) e componenti;
- VRF e componenti.

Le parti costituenti l'involucro esterno del fabbricato sono state progettate per rispettare i valori limite di trasmittanza termica fissati dal Decreto Requisiti Minimi[5].

Sono riportati in tabella 17 i valori di trasmittanza termica degli elementi edilizi oggetto di analisi e i valori di trasmittanza limite stabiliti dal Decreto Requisiti Minimi.

Tabella 17 Valori di trasmittanza termica degli elementi dell'involucro edilizio nell'edificio oggetto di analisi e valori di trasmittanza limite stabiliti dal Decreto Requisiti Minimi

Elemento edilizio	Classificazione – Decreto Requisiti Minimi	$U_{S-XPS/ S-FC}$ [W/ (m ² K)]	U_{rif} [W/ (m ² K)]
Pareti perimetrali verticali	Struttura opaca verticale verso l'esterno	0,209	0,290
Copertura esterna	Struttura opaca inclinata di copertura verso l'esterno	0,210	0,260
Pavimento di interpiano	Struttura opaca orizzontale interpiano	0,245	0,800
Pavimento controterra	Struttura opaca orizzontale di pavimento controterra	0,250	0,290
Aperture finestrate	Chiusure tecniche trasparenti verso l'esterno	1,400	1,800

Obiettivi specifici della ricerca sono i seguenti:

- Stima degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti associati ai principali costituenti dell'involucro esterno e degli elementi divisorii interni dell'immobile;
- Stima degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti associati ai principali componenti dell'impianto fotovoltaico e del sistema di climatizzazione;
- Valutazione dell'incidenza dei singoli componenti di involucro e di impianto sulle prestazioni energetiche e sulle emissioni di gas climalteranti complessive;
- Confronto degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti connesse al sistema in esame nelle Configurazioni 1 e 2.

4.2 Definizione del campo di applicazione

4.2.1 Unità funzionale

L'unità funzionale dello studio è costituita da un edificio ad uso ufficio ad energia netta zero nella fase d'uso, avente una vita utile di 60 anni. Le caratteristiche termofisiche e le dimensioni degli elementi dell'involucro esterno, gli elementi divisorii interni negli scenari XPS ed FC e i componenti dell'impianto negli scenari cAE e sAE sono descritti nella seguente tabella 18.

Tabella 18 Componenti d'involucro e d'impianto

Componenti edilizi	Scenari	
	XPS	FC
Aperture finestrate [m ²]		120,87
Trasmittanza [W/ (m ² K)]		1,40
Copertura esterna[m ²]	641,62	642,73
Trasmittanza [W/(m ² K)]		0,21
Pavimento di interpiano [m ²]	641,62	642,73
Trasmittanza [W/(m ² K)]		0,245
Pareti perimetrali verticali [m ²]	731,09	735,050
Trasmittanza [W/(m ² K)]		0,209
Pavimento controterra [m ²]	641,62	642,73
Trasmittanza [W/(m ² K)]		0,25
Porta esterna [m ²]		7,00
Pareti divisorie interne [m ²]		372,78
Porte interne [m ²]		76,50
Componenti d'impianto		
Componenti per l'impianto di climatizzazione		
VRF 1 [Unità]		1
Potenza in raffreddamento [kW]		28
Potenza in riscaldamento [kW]		31,50
VRF 2 [Unità]		1
Potenza in raffreddamento [kW]		33,50
Potenza in riscaldamento [kW]		37,50
Impianto fotovoltaico	cAE	sAE
Pannello fotovoltaico – Potenza installata (kW)		26,40
Accumulo elettrochimico – Capacità energetica (kWh)	30	-

Le lievi differenze in termini di dimensioni riscontrate tra i valori ottenuti nei due scenari XPS e FC analizzati sono causate dal differente spessore di strato isolante, necessario per ottenere lo stesso valore di trasmittanza al variare della tipologia di materiale isolante adoperato.

4.2.2 Confini del sistema

I confini del sistema sono stati scelti con un approccio dalla culla alla tomba e includono i seguenti moduli:

- Modulo A – fase di produzione. Include i moduli A1 (processi di estrazione e trasformazione delle materie prime e/o il processo di trasformazione dei materiali secondari), A2 (trasporto dal sito di estrazione/trasformazione o di riciclo alla fabbrica in cui avviene la produzione dei materiali/componenti edili e di impianto) e A3 (produzione dei materiali/componenti edili e dei componenti di impianto).
I moduli “A4 – trasporto” e “A5 – costruzione e installazione” non sono stati considerati perché al di fuori del campo di applicazione dello studio LCA.
- Modulo B – fase d'uso. Include i moduli B4 (sostituzione di elementi non strutturali ed impiantistici) e B6 (usi energetici). Gli altri moduli sono stati esclusi dall'analisi poiché non rientrano nel campo di applicazione dello studio.
- Modulo C – fine vita. Include il modulo C4 (processo di smaltimento finale dei componenti di involucro e di impianto).
- Modulo D – benefici e carichi ambientali oltre i confini del sistema. Questo modulo include i benefici ambientali legati all'immissione in rete del surplus di produzione di energia elettrica da parte dell'impianto fotovoltaico.

4.2.3 Categorie di impatto ambientale e metodologie di valutazione degli impatti

In tabella 19 sono elencate le categorie di impatto energetico – ambientale selezionate:

Tabella 19 Categorie d’impatto considerate nello studio

Categoria d’impatto	Unità di misura	Acronimo
Energia incorporata	MJ	EE
Energia incorporata, non rinnovabile	MJ	EE _r
Energia incorporata, rinnovabile	MJ	EE _{nr}
Cambiamento climatico	kg CO _{2eq}	GWP
Cambiamento climatico – fossile	kg CO _{2eq}	GWP _f
Cambiamento climatico – biogenico	kg CO _{2eq}	GWP _b
Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo	kg CO _{2eq}	GWP _{LULUC}

Gli impatti energetici sono stati valutati mediante una stima dell’energia incorporata nel sistema di prodotto, prendendo in considerazione i contributi di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile. La stima degli impatti energetici è stata effettuata attraverso il metodo: Cumulative Energy Demand (CED) [16], per il calcolo dell’energia primaria incorporata suddivisa in energia primaria rinnovabile e non rinnovabile; Per il calcolo delle emissioni di gas climalteranti è stato usato il metodo EN 15804 +A2 Method V1.00, basato sul metodo EF 3.0 sviluppato da Fazio et al.[17].

5 Analisi di inventario di ciclo di vita e qualità dei dati

5.1 Analisi di inventario – Fase di produzione (Modulo A)

Nel corso della fase di analisi di inventario sono stati raccolti i dati utili alla modellizzazione dei costituenti dell’involucro edilizio, del sistema fotovoltaico e dell’impianto di climatizzazione.

Lo studio si avvale sia di dati primari che di dati secondari. In dettaglio, i dati primari (foreground) riguardanti le quantità e le tipologie di materiali utilizzati nella realizzazione dei componenti di involucro e di impianto, sono stati ricavati dalla Parte A; i dati secondari (background), riguardanti gli eco-profilo dei materiali e delle tipologie tecnologiche di generazione di energia, sono stati ricavati dal database ambientale Ecoinvent 3.6 [18] e si riferiscono al contesto italiano, quando possibile, o a quello europeo.

I risultati della fase di raccolta e di elaborazione dei dati primari selezionati per la modellizzazione dei componenti dell’involucro edilizio sono sintetizzati in tabella 18.

Nella tabella 20 sono riportati i materiali che costituiscono l’inventario, le relative quantità e i dataset ambientali selezionati per la modellizzazione degli eco-profilo dei suddetti materiali.

I carichi ambientali legati all’approvvigionamento delle materie prime, ai trasporti, al processo di produzione dei materiali e dei componenti utilizzati nell’immobile e allo smaltimento degli scarti di produzione, sono inclusi nei dataset ambientali. Sono dunque rappresentativi dell’impatto ambientale legato ai moduli A1, A2 ed A3.

Tabella 20 Materiali che costituiscono i componenti dell'involucro edilizio e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione

Componente	Materiale	Scenario XPS	Scenario FC	Dataset impiegati
Aperture finestrate	Telaio in legno [m ²]		12,09	Windows frame wood production, U=1,5 W/(m ² K)
	Vetrocamera, riempimento con argon [m ²]		108,78	Glazing double production, U<1,1 W/(m ² K)
Porte interne	Legno [m ²]		76,50	Door inner wood production
Porta esterna	Legno [m ²]		7,00	Door inner wood production
Copertura esterna	Ceramica [kg]	34.647,46	34.707,66	Ceramic tile production
	Malta cementizia [kg]	25.664,78	25.709,38	Cement mortar production
	Isolante XPS [kg]	3.143,94	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	4.627,69	Cellulose fibre production
	Guaina impermeabilizzante [kg]	3.945,96	3.952,82	Bitumen seal production
	Cemento armato [kg]	102.660,37	102.844,55	Fibre-reinforced concrete production
	Laterizio forato [kg]	43.417,64	43.498,84	Light clay brick production
	Gesso-intonaco [kg]	19.633,56	19.667,67	Gypsum quarry operation
Pareti perimetrali verticali	Gesso-intonaco [kg]	44.742,63	44.984,82	Gypsum quarry operation
	Laterizio forato [kg]	153.711,42	154.543,42	Light clay brick production
	Isolante XPS [kg]	1.535,29	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	2.315,39	Cellulose fibre production
Pareti divisorie interne	Gesso-intonaco [kg]	22.813,89	22.813,89	Gypsum quarry operation
	Laterizio forato [kg]	21.621,01	21.621,01	Light clay brick production
Pavimento contro terra	Ceramica [kg]	15.694,02	15.694,02	Ceramic tile production
	Malta cementizia [kg]	102.659,14	102.837,50	Cement mortar production
	Isolante XPS [kg]	2.021,10	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	2.892,30	Cellulose fibre production
	Cemento armato [kg]	769.943,52	771.281,3	Fibre-reinforced concrete production
Pavimento di interpiano	Isolante XPS [kg]	2.245,67	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	3.181,54	Cellulose fibre production
	Ceramica [kg]	15.694,02	15.694,02	Ceramic tile production
	Malta cementizia [kg]	102.659,14	102.837,50	Cement mortar production
	Cemento armato [kg]	384.971,76	385.640,64	Fibre-reinforced concrete production
	Gesso-intonaco [kg]	19.633,56	19.667,67	Gypsum quarry operation

Nella tabella 21 sono riportati i dati primari impiegati per la modellizzazione dei componenti dell'impianto di climatizzazione.

Tabella 21 Componenti dell'impianto di climatizzazione per piano terra e primo piano

Unita'	Componente	Quantità
VRF	VRF, potenza in raffreddamento 28 kW, potenza in riscaldamento 31,5 kW	1
	VRF, potenza in raffreddamento 33,5 kW, potenza in riscaldamento 37,5 kW	1
	Batteria a espansione diretta potenza in raffreddamento 2,2 kW, potenza in riscaldamento 2,5 kW	12
	Batteria a espansione diretta potenza in raffreddamento 1,5 kW, potenza in riscaldamento 1,7 kW	4
	Batteria a espansione diretta potenza in raffreddamento 2,8 kW, potenza in riscaldamento 3,2 kW	7
	Batteria a espansione diretta potenza in raffreddamento 3,6 kW, potenza in riscaldamento 4,2 kW	2
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 1/4" x 1/2" 72,60 m	Rame[kg] 120,93 Poliuretano espanso[kg] 32,37
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 3/8" x 1/2" 6,00 m	
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 3/8" x 5/8" 30,00 m	
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 3/8" x 3/4" 14,00 m	
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 3/8" x 7/8" 27,40 m	
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 1/2" x 1 1/8" 7,00 m	
	N.1 Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano 5/8" x 1 1/8" 3,00 m	
N.1 Sistema di derivazione (fino a 68 kW)	Rame[kg] 293,29	
N.8 Sistema di derivazione (22-68 kW)		
N.16 Sistema di derivazione (22 kW)		
VMC	N.6 Pannelli acciaio	Lamiera zincata [kg] 16,43 Lana minerale[kg] 3,31 Acciaio [kg] 15,12
	N.2 Bocchette aspirazione	Alluminio[kg] 3,97
	N.1 Filtro a setto sintetico ondulato G4	Poliestere acrilico [kg] 0,10 Lamierino zincato [kg] 1,90
	N.1 Filtro F9	Plastica [kg] 1,90 Microfibra di vetro [kg] 0,10
	N.1 Ventilatore	Acciaio zincato[kg] 64
	N.1 Recuperatore di calore	Rame [kg] 30 Acciaio [kg] 30
	N.1 Canale rettangolare in alluminio isolato in polietilene DN (400 · 200)	Alluminio[kg] 174,90 Poliuretano espanso [kg] 144,14
	N.2 Canale circolare in alluminio isolato in polietilene DN 500	
	N.5 Canale circolare in alluminio isolato in polietilene DN 400	
	N.2 Canale circolare in alluminio isolato in polietilene DN 350	
N.2 Canale circolare in alluminio isolato in polietilene DN 300		
N.2 Canale circolare in alluminio isolato in polietilene DN 250		

Nella tabella 22 sono riportati i dataset ambientali selezionati per la modellizzazione dei materiali e dei componenti dell'impianto di climatizzazione.

Il dataset selezionato per la modellizzazione del VRF e della batteria ad espansione diretta è stato adattato al sistema in esame considerando le differenze esistenti tra le sue caratteristiche reali (di potenza e portata) a quelle del sistema esaminato nel dataset impiegato.

Infine, a causa della mancanza di dati per la modellizzazione, sono stati esclusi dallo studio termometri e manometri.

Tabella 22 Materiali, componenti e dataset ambientali utilizzati dell'impianto di climatizzazione

Unità	Componente	Dataset impiegati
VRF	VRF, potenza in raffreddamento 28 kW, potenza in riscaldamento 31,5 kW	Heat pump, brine-water 10 kW production (dataset adattato al caso studio)
	VRF, potenza in raffreddamento 33,5 kW, potenza in riscaldamento 37,5 kW	
	Batteria a espansione diretta, potenza in raffreddamento 2,2 kW, potenza in riscaldamento 2,5 kW	Ventilation system, decentralized, 6x120 m ³ /h, polyethylene ducts production" (dataset adattato al caso studio)
	Batteria a espansione diretta, potenza in raffreddamento 1,5 kW, potenza in riscaldamento 1,7 kW	
	Batteria a espansione diretta, potenza in raffreddamento 2,8 kW, potenza in riscaldamento 3,2 kW	
	Batteria a espansione diretta, potenza in raffreddamento 3,6 kW, potenza in riscaldamento 4,2 kW	
	Tubazioni in rame con guaina isolante in poliuretano espanso (1/4" x 1/2"), (3/8" x 1/2"), (3/8" x 5/8"), (3/8" x 3/4"), (3/8" x 7/8"), (1/2" x 1 1/8"), (5/8" x 1 1/8")	
	Rame	Copper, production
	Poliuretano espanso	Polyurethane, rigid foam production
	Sistema di derivazione	
Rame	Copper, production	
VMC	Pannelli acciaio	
	Lamiera zincata	Chromium steel, production
	Lana minerale	Glass wool mat
	Acciaio	Chromium steel, production
	Bocchette aspirazione	
	Alluminio	Aluminium, production primary ingot
	Filtri a setto sintetico ondulato G4	
	Poliestere acrilico	Polyester fibre production
	Lamierino zincato	Chromium steel, production
	FILTRO F9	
	Plastica	Polypropylene granulate production
	Microfibra di vetro	Glass wool mat
	VENTILATORE	
Acciaio zincato	Chromium steel, production	
RECUPERATORE DI CALORE		
Rame	Copper, production	
Acciaio	Chromium steel, production	
Canali dell'aria		
Alluminio	Aluminium, production primary ingot	
Poliuretano espanso	Polyurethane, rigid foam production	

L'impianto fotovoltaico è stato modellizzato impiegando il dataset "Photovoltaic slanted-roof installation, 3 kWp, single-Si, panel mounted on roof", adattato alla potenza dell'impianto di 26,4 kW.

Il suddetto database include:

- Processo di produzione del pannello fotovoltaico in silicio monocristallino (single-Si);
- Processo di produzione dell'inverter;
- Processo di produzione dei componenti necessari per l'installazione dei pannelli fotovoltaici sul tetto;
- Processo di produzione dei componenti elettrici necessari per il collegamento del sistema fotovoltaico con la rete elettrica di distribuzione e con l'impianto elettrico dell'edificio;
- Trattamento di fine vita degli scarti di produzione.

Il sistema di accumulo elettrochimico, costituito da una batteria agli ioni di litio (30 kWh di capacità) è stato modellizzato sulla base dello studio condotto da Cusenza et al.[19].

5.2 *Analisi di inventario – Fase d'uso (Modulo B)*

L'intervallo di tempo che intercorre tra la fine dei lavori di costruzione e la demolizione o decostruzione dell'immobile è inclusa nel modulo "B – fase d'uso". In accordo all'obiettivo e al campo di applicazione, nel modello LCA sono stati inclusi i moduli "B4 – sostituzione" e "B6 – consumo di energia".

5.3 *Analisi di inventario – Fase di sostituzione (Modulo B4)*

La fase di sostituzione (Modulo B4) comprende sia la fase di produzione degli elementi di involucro non strutturale e di impianto sostituiti durante la vita utile dell'edificio sia i trattamenti di fine vita dei componenti sostituiti. La fase di produzione dei componenti di involucro e di impianto è stata modellizzata con i dataset descritti al Paragrafo 5.1. mentre per i trattamenti di fine vita dei componenti di involucro e di impianto si rimanda al Paragrafo 5.5 "Modulo C".

Gli interventi di sostituzione previsti includono:

- Sostituzione di chiusure trasparenti considerando una vita utile degli infissi pari a 30 anni;
- Sostituzione della guaina impermeabilizzante della copertura esterna considerando una vita utile pari a 30 anni;
- Sostituzione del gesso intonaco e dell'isolante delle pareti verticali e del pavimento di interpiano considerando una vita utile pari a 30 anni;
- Sostituzione del 10% di ceramica della copertura esterna e del pavimento controterra durante la sostituzione di elementi non strutturali (guaina, isolante) considerando una vita utile pari a 30 anni;
- Sostituzione della malta cementizia e dell'isolamento termico, della copertura esterna e del pavimento controterra considerando una vita utile pari a 30 anni;
- Sostituzione dell'impianto di climatizzazione (UTA e VRF) considerando una vita utile degli impianti di 15 anni;
- Sostituzione dei filtri dell'unità di trattamento aria considerando una vita utile pari a 6 mesi;
- Sostituzione dell'impianto fotovoltaico considerando una vita utile di 30 anni;
- Sostituzione del sistema di accumulo considerando una vita di 20 anni.

Nella tabella 23 sono riportati gli interventi di sostituzione dei componenti di involucro pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio.

Tabella 23 Interventi di sostituzione dei componenti di involucro pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio

Componente	Interventi di sostituzione pianificati		Materiale Sostituito	Scenario XPS	Scenario FC
Aperture finestrate	1		Telaio in legno [m ²]	12,09	
			Vetrocamera, riempimento con argon [m ²]	108,78	
Copertura esterna	1		Ceramica [kg]	3.464,75	3.470,76
			Malta cementizia [kg]	25.664,78	25.709,38
			Isolante XPS [kg]	3.143,94	-
			Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	4.627,69
			Guaina impermeabilizzante [kg]	3.945,96	3.952,82
Pareti perimetrali verticali	1		Gesso-intonaco [kg]	44.742,63	44.984,82
			Isolante XPS [kg]	1.535,29	-
			Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	2315,39
Pavimento contro terra	1		Ceramica [kg]	1.569,40	1.569,40
			Malta cementizia [kg]	102.659,14	102.837,50
			Isolante XPS [kg]	2.021,10	-
			Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	2.892,30
Pavimento di interpiano	1		Isolante XPS [kg]	2.245,67	-
			Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	3.181,54
			Gesso-intonaco [kg]	19.633,56	19.667,67

Nella tabella 24 sono riportati gli interventi di sostituzione dei componenti di impianto pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio.

Tabella 24 Interventi di sostituzione dei componenti d'impianto pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio

Componente	Interventi di sostituzione pianificati		Materiali/componenti sostituiti
	Scenario cAE	Scenario sAE	
	UTA	2	
VRF	2		Impianto comprensivo di tutti i componenti
Filtro G4	120		Filtro
Filtro F9	120		Filtro
Impianto fotovoltaico	1		Impianto comprensivo di tutti i componenti
Accumulo elettrico	2	0	Impianto comprensivo di tutti i componenti

5.4 *Analisi di inventario – Consumo di energia (Modulo B6)*

Il Modulo B6 include il consumo di energia dell'edificio durante la fase d'uso.

Gli usi energetici dell'edificio sono stati stimati tramite simulazioni termofisiche in regime dinamico effettuate tramite utilizzo del software TRNSYS (Parte A).

Nella tabella 25 si riportano i risultati delle simulazioni energetiche e i dataset utilizzati per la modellizzazione dei consumi energetici di fase d'uso.

Tabella 25 Risultati della simulazione energetica dell'edificio nello Scenario cAE e Scenario sAE e dataset selezionati per la modellizzazione dei consumi energetici di fase d'uso

Energia elettrica	Scenario cAE [kWh/anno]	Scenario sAE [kWh/anno]	Dataset impiegati
Generata in situ dall'impianto fotovoltaico	38.372,81	38.372,81	-
Generata in situ dall'impianto fotovoltaico e consumata direttamente nell'edificio	17.974,61	17.958,64	Electricity low voltage (IT) production, photovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, single-Si panel*
Generata in situ dall'impianto fotovoltaico e fornita all'edificio attraverso il sistema di accumulo (sono inclusi i consumi connessi all'efficienza del sistema di accumulo)	2.809,79	-	Electricity low voltage (IT) production, photovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, single-Si panel*
Importata dalla rete elettrica	13.975,70	16.599,09	Electricity, low voltage (IT)
Immessa nella rete elettrica (computata nel modulo D)	17.311,45	20.410,38	Electricity, low voltage (IT)

*Dal dataset sono stati eliminati i processi relativi alla produzione dell'impianto e dei suoi componenti, poiché computati nel modulo A

5.5 *Analisi di inventario – Fase di fine vita (Modulo C)*

La fase di fine vita (Modulo C) comprende le operazioni incluse tra il fuori servizio dell'edificio e lo smaltimento finale. Il fine vita dei componenti di involucro e di impianto è stato modellizzato secondo uno scenario che ha previsto diverse opzioni di trattamento, quali lo smaltimento in discarica, l'incenerimento o il recupero attraverso processi di riciclo. Nel Modulo C sono stati inclusi i processi connessi allo smaltimento in discarica o all'incenerimento (Modulo "C4 – smaltimento"). Nella tabella 26 sono riportati i dataset utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei materiali costituenti l'involucro edilizio e le quantità di materiali trattati.

Tabella 26 Materiali e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'involucro edilizio – Scenario XPS e Scenario FC

Componente	Materiale	Scenario XPS	Scenario FC	Dataset Ecoinvent impiegati
Aperture finestrate	Telaio in legno [m ²]	12,09		Treatment of inert waste, inert material landfill
	Vetrocamera, riempimento con argon [m ²]	108,78		Treatment of used double glazing U<1.1 W/(m ² K), collection for final disposal
Porte interne	Legno [m ²]	76,50		Treatment of used inner wood door, collection for final disposal
Porta esterna	Legno [m ²]	7,00		Treatment of used inner wood door, collection for final disposal
Copertura esterna	Ceramica [kg]	34.647,46	34.707,66	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Malta cementizia [kg]	25.664,78	25.709,38	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante XPS [kg]	3.143,94	-	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	4.627,69	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Guaina impermeabilizzante [kg]	3.945,96	3.952,82	Treatment of waste bitumen, sanitary landfill
	Cemento armato [kg]	102.660,44	102.844,26	Treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal
	Laterizio forato [kg]	43.417,64	43.498,84	Treatment of inert waste, inert material landfill
Pareti perimetrali verticali	Gesso-intonaco [kg]	19.633,56	19.667,67	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Gesso-intonaco [kg]	44.742,63	44.984,82	Treatment of inert waste, inert material landfill
	laterizio forato [kg]	153.711,42	154.543,42	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante XPS [kg]	1.535,29	-	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	2.315,39	Treatment of inert waste, inert material landfill
Pareti divisorie interne	Gesso-intonaco [kg]	2.2813,89	2.2813,89	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Laterizio forato [kg]	21.621,01	21.621,01	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Ceramica [kg]	15.694,02	15.694,02	Treatment of inert waste, inert material landfill
Pavimento contro terra	Malta cementizia [kg]	102.659,14	102.837,50	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante XPS [kg]	2.021,10	-	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	2.892,30	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Cemento armato [kg]	769.943,52	771.281,28	Treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal
Pavimento di interpiano	Isolante XPS [kg]	2.245,67	-	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante in fibra di cellulosa [kg]	-	3.181,54	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Ceramica [kg]	15.694,02	15.694,02	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Malta cementizia [kg]	102.659,14	102.837,50	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Cemento armato [kg]	384.971,76	385.640,64	Treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal
	Gesso-intonaco [kg]	19.633,56	19.667,67	Treatment of inert waste, inert material landfill

Nella tabella 27 sono riportati i dataset utilizzati e la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei materiali costituenti i VRF e l'unità di trattamento aria.

In dettaglio, per i componenti di impianto principali si è considerato il conferimento in discarica. Inoltre, è stato considerato un trattamento di riciclo per il rame presente nei sistemi di derivazione, nelle tubazioni e nell'UTA.

Il fine vita delle materie plastiche di tutti i componenti di impianto è stato modellizzato secondo i trattamenti previsti dai dataset specifici di ogni impianto e ogni componente quando disponibili, oppure ipotizzando un trattamento basato sul mix tecnologico riferito al contesto europeo che prevede principalmente il conferimento in discarica controllata e il trattamento termico (incenerimento), secondo i dataset disponibili su Ecoinvent 3.6 [18].

Per i processi di riciclo si è applicato l'approccio "Recycled content, cut-off" in base al quale gli impatti e i benefici ambientali connessi ai processi di riciclo sono attribuiti agli impieghi di seconda vita dei materiali riciclati

Tabella 27 Modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'impianto di climatizzazione

Componente	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei processi di produzione
VRF	
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Acciaio rinforzato	Treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal
Rame	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Olio lubrificante	Treatment of waste oil mineral
Polivinilcloruro	Treatment of waste polyvinylchloride
Refrigerante R410a	Treatment of hazardous waste, incineration
Tube isolante in elastomero	Treatment of waste plastic mixture
Batteria a espansione diretta	Used air distribution terminal panel, steel Used blower and heat exchange unit decentralized Used ventilation control and wiring decentralized unit
Sistemi di derivazioni fluido refrigerante	
Rame	Cut-off
Tubazioni	
Rame	Cut-off
Poliuretano	Treatment of waste plastic mixture
Unità trattamento aria	
Lamiera Zincata	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Lana minerale	Treatment of waste plastic mixture
Microfibra	Treatment of waste plastic mixture
Alluminio	Treatment of inert waste, inert material landfill
Poliestere	Treatment of waste plastic mixture
Plastica	Treatment of waste plastic mixture
Rame	Cut-off
Canali dell'aria DN	
Alluminio	Treatment of inert waste, inert material landfill
Poliuretano	Treatment of waste plastic mixture

Il fine vita per alcuni componenti di fotovoltaico e per l'accumulo è stata modellizzato considerando dei trattamenti di riciclo in accordo alle direttive vigenti [20] [21].

In accordo alle regole di categoria relative all'impronta ambientale dei prodotti (Product Environmental Footprint Category Rules – PEFCRs) [22] sugli impianti fotovoltaici e agli studi sviluppati nel Photovoltaic Power System Programme dell'International Energy Agency (IEA – PVPS) nell'ambito della Task 12 “PV Sustainability” [23] il trattamento di fine vita del sistema fotovoltaico ha previsto il disassemblaggio dei singoli componenti e il recupero dei materiali quali il vetro, l'alluminio, il rame e l'acciaio, mentre per le celle fotovoltaiche si è ipotizzato il conferimento in discarica per inerti in accordo alle indicazioni riportate nelle PERCRs sopracitate.

Nella tabella 28 sono riportati i dataset utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei materiali costituenti il sistema fotovoltaico non avviati a processi di riciclo. Il modello di fine vita descritto è rappresentativo di entrambi gli scenari di impianto esaminati poiché per l'accumulo elettrico è stato applicato un cut-off.

Tabella 28 Modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti del sistema fotovoltaico

Componente	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei processi di produzione
Inverter	Treatment of waste plastic mixture Used printed wiring boards
Sistema di montaggio	Treatment of waste polyethylene/polypropylene product
	Treatment of waste polystyrene isolation, flame-retardant
Componenti elettrici	Treatment of scrap copper
	Treatment of scrap steel
	Treatment of waste polyethylene/polypropylene product
	Treatment of waste polyvinylchloride
Pannello fotovoltaico (ad eccezione delle parti inviate a riciclo)	Treatment of waste electric wiring
	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Treatment of waste polyvinylchloride
	Treatment of waste plastic mixture

5.6 Analisi di inventario – Benefici e oneri oltre i confini del sistema (Modulo D)

Il Modulo D include i processi di riciclo e i potenziali benefici ambientali in termini di produzioni evitate grazie alla sostituzione delle materie prime vergini con materie prime seconde o all'immissione in rete del surplus di energia rinnovabile prodotta in situ.

Nel caso studio specifico, poiché è stato applicato un approccio “Recycled content, cut-off”, gli impatti e i benefici ambientali connessi ai materiali e componenti d'impianto avviati al riciclo non sono stati valutati. I benefici ambientali connessi all'immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall'impianto fotovoltaico sono stati stimati assumendo che l'immissione di energia elettrica in rete eviti la produzione di una quantità equivalente di energia elettrica generata dal mix elettrico di produzione italiano (si rimanda all'esame della tabella 25 per ulteriori dettagli).

6 Valutazione degli impatti energetici e ambientali di ciclo di vita: risultati e discussione

6.1 Impatti energetico – ambientali – Modulo A

Energia incorporata – Componenti d’involucro

Nella tabella 29 sono sintetizzati i valori di energia incorporata dell’involucro edilizio per gli scenari XPS e FC.

Tabella 29 Modulo A: Energia incorporata nei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria	Scenario XPS	Scenario FC
EE (MJ)	4,17E+06	3,35E+06
EE _{nr} (MJ)	3,64E+06	2,80E+06
EE _r (MJ)	5,30E+05	5,49E+05

Nello scenario XPS l’energia incorporata nei componenti edilizi analizzati è pari a 4,17E+06 MJ di energia primaria di cui l’87% costituito da energia primaria non rinnovabile. Nello scenario FC, l’energia incorporata nei componenti edilizi analizzati è pari a 3,35E+06 MJ di energia primaria di cui l’84% costituito da energia primaria non rinnovabile.

L’impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa consente di ridurre l’EE nello scenario FC del 20% rispetto allo scenario XPS. Inoltre, l’impatto sul consumo di energia primaria non rinnovabile si riduce del 23%.

Nella figura 39 è illustrata l’incidenza dei componenti dell’involucro edilizio sull’EE nello scenario XPS.

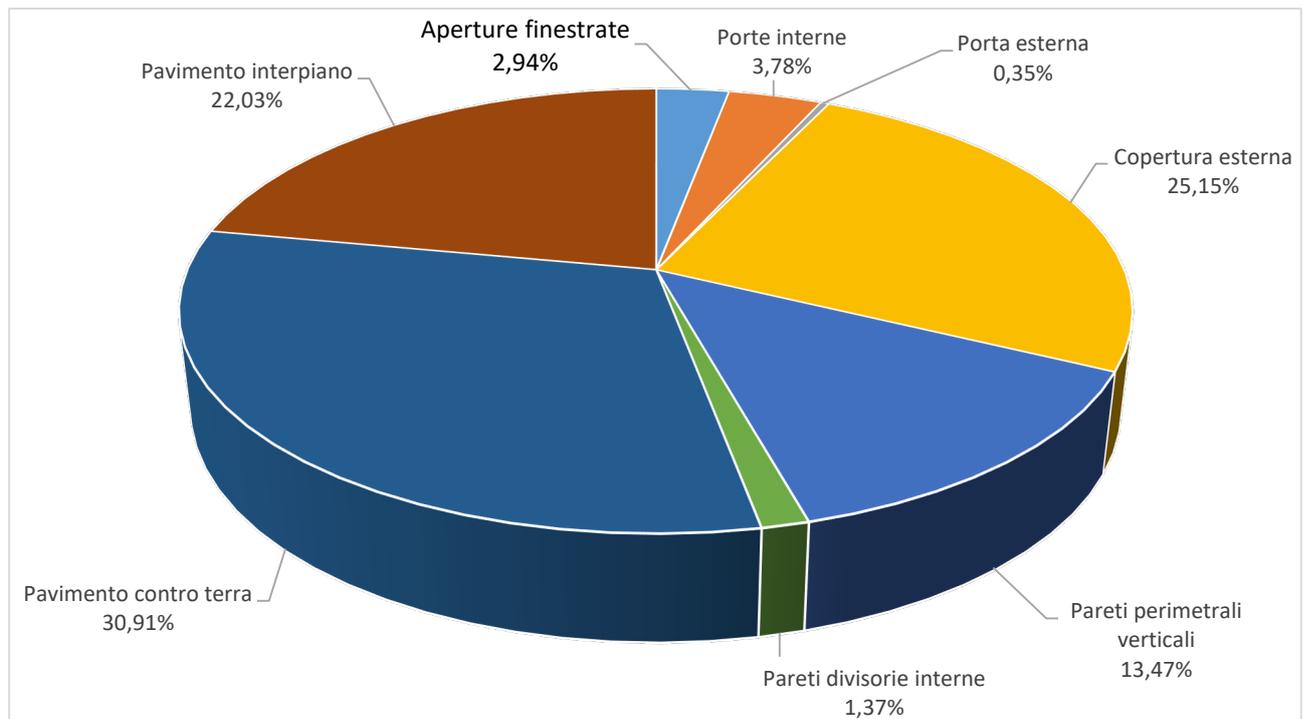


Figura 39 Modulo A: Incidenza dei componenti d’involucro sull’EE – Scenario XPS

I componenti che maggiormente contribuiscono all' impatto sono: il pavimento controterra che rappresenta circa il 31% dell'EE, la copertura esterna che incide sull'EE per circa il 25% e il pavimento di interpiano che contribuisce al 22% dell'EE. Complessivamente i componenti sopracitati sono responsabili del 78% dell'EE. Infine, le pareti perimetrali incidono per circa il 14% e gli altri componenti incidono sul consumo di energia primaria per meno dell'8%.

Nella figura 40 è illustrata l'incidenza dei componenti dell'involucro edilizio sull'EE nello scenario FC.

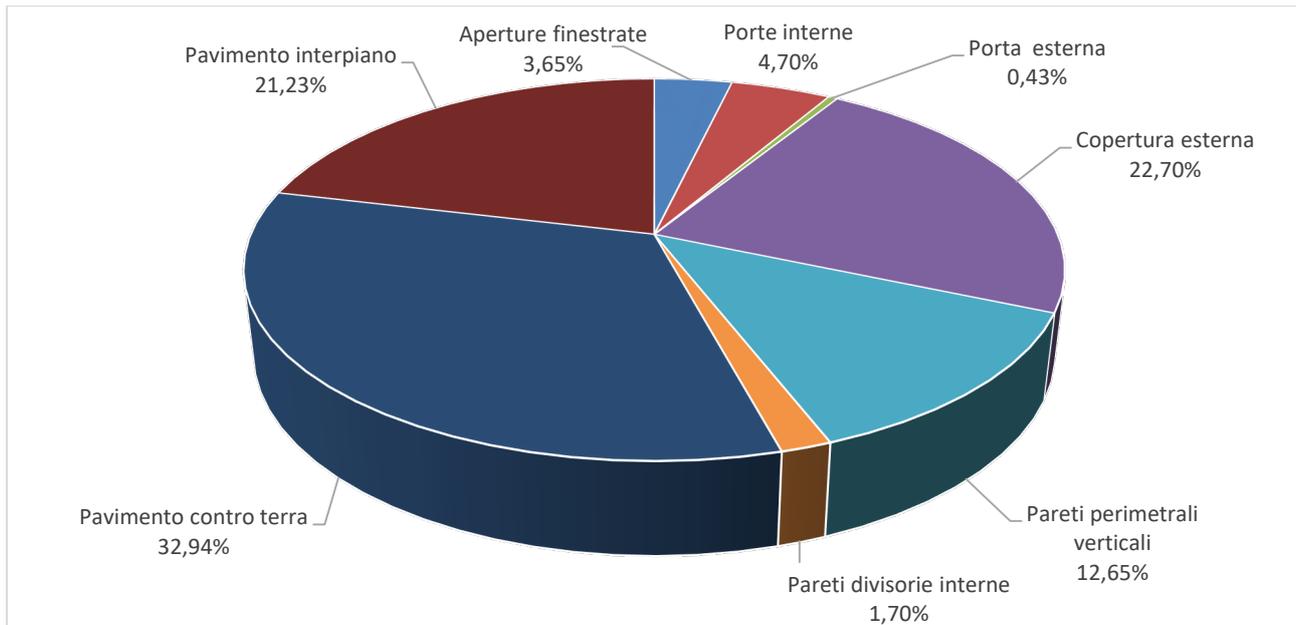


Figura 40 Modulo A: Incidenza dei componenti d'involucro sull'EE – Scenario FC

Nella tabella 30 sono sintetizzati i valori di energia incorporata connessi all'involucro edilizio per entrambi gli scenari.

Tabella 30 Modulo A: Confronto energia incorporata nei componenti d'involucro scenario XPS-FC

	Aperture finestrate	Porte interne	Porta esterna	Copertura esterna	Pareti perimetrali verticali	Pareti divisorie interne	Pavimento contro terra	Pavimento di interpiano
Scenario XPS	1,22E+05	1,57E+05	1,44E+04	1,05E+06	5,62E+05	5,69E+04	1,29E+06	9,18E+05
Scenario FC	1,22E+05	1,57E+05	1,44E+04	7,60E+05	4,23E+05	5,69E+04	1,10E+06	7,11E+05

I componenti che contribuiscono maggiormente all'impatto sono: il pavimento controterra che rappresenta circa il 33% dell'EE, la copertura esterna che incide sull'EE per circa il 23% e il pavimento di interpiano che contribuisce a circa il 21% dell'EE. Complessivamente i componenti sopracitati sono responsabili circa del 77% dell'EE.

Infine, le pareti perimetrali incidono per il 12% e gli altri componenti incidono sul consumo di energia primaria per meno dell'11%.

Di seguito è riportata, per ciascun componente, un'analisi di dominanza che ha consentito di identificare i materiali responsabili del maggior contributo al consumo di energia primaria.

Pavimento controterra

Nella figura 41 è illustrata l'incidenza dei materiali del pavimento controterra sull'EE negli scenari XPS e FC.

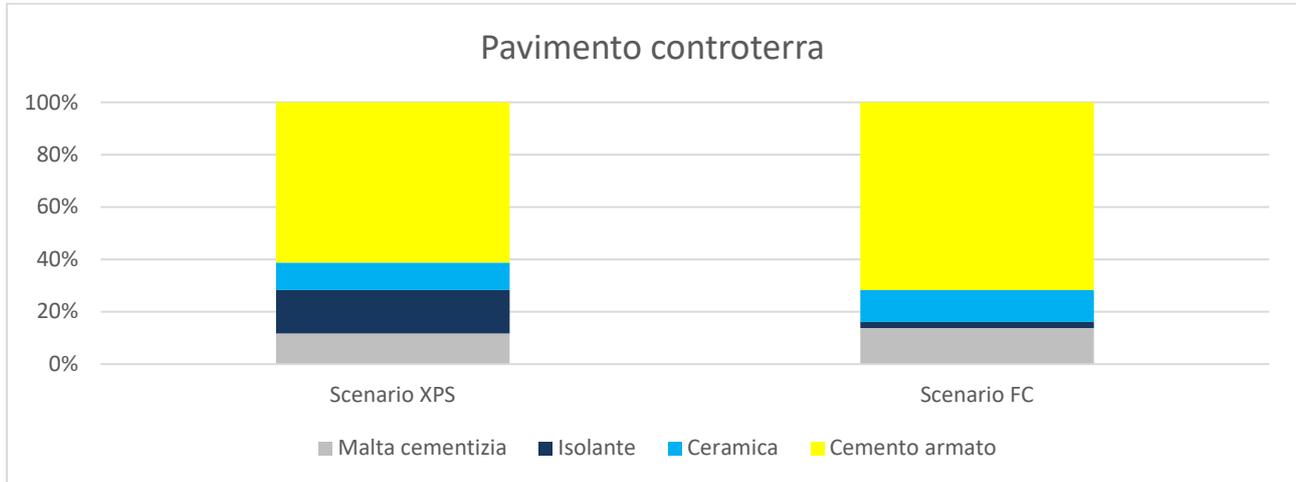


Figura 41 Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono il pavimento controterra – Scenari XPS e FC

In entrambi gli scenari, il componente che contribuisce in misura maggiore all'impatto è il cemento armato (che rappresenta rispettivamente il 61% dell'EE nello scenario XPS e il 72% nello scenario FC).

L'isolante nello scenario XPS incide sull'impatto per il 17% e nello scenario FC per il 2%, l'uso dell'isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso consente dunque di ridurre l'impatto del 15%.

Copertura esterna (tetto)

Nella figura 42 è illustrata l'incidenza dei materiali della copertura esterna sull'EE negli scenari XPS e FC.

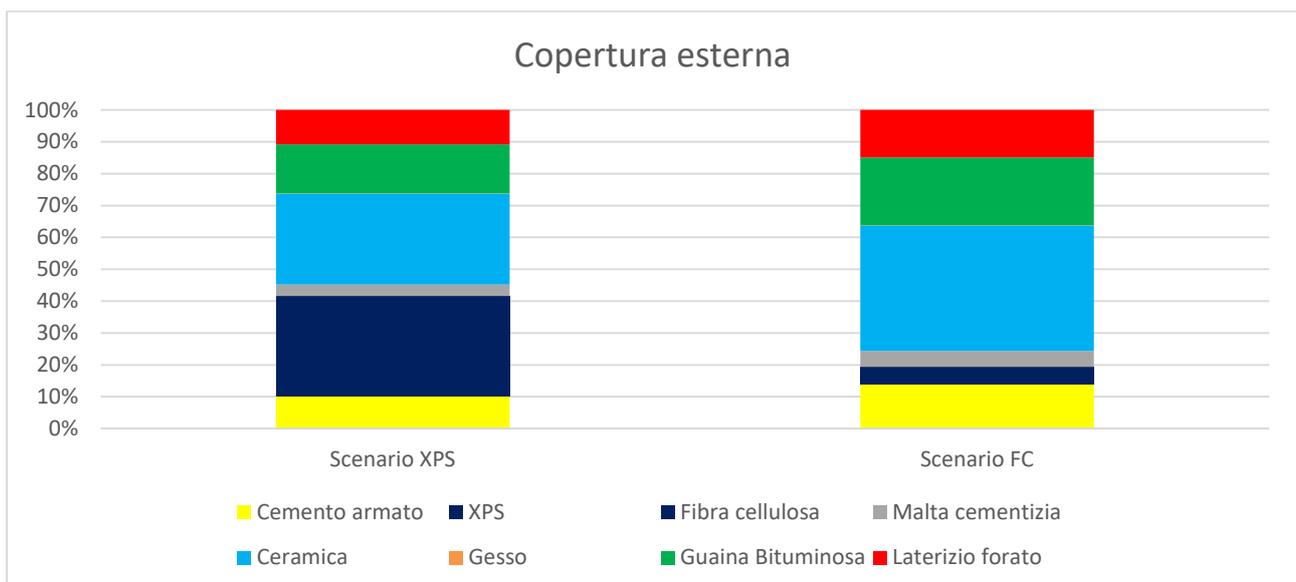


Figura 42 Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono la copertura esterna – Scenari XPS e FC

I componenti che contribuiscono in misura maggiore all'impatto sono l'isolante XPS (32%) nello scenario XPS e la ceramica (39% di EE) nello scenario FC.

La guaina bituminosa incide per il 16% nello scenario XPS e per il 21% nello scenario FC.

L'isolante nello scenario XPS incide sull'impatto per il 32% e nello scenario FC per il 6%, l'uso dell'isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso consente dunque di ridurre l'impatto del 26%.

Pavimento di interpiano

Nella figura 43 è illustrata l'incidenza dei materiali del pavimento di interpiano sull'EE negli scenari XPS e FC.

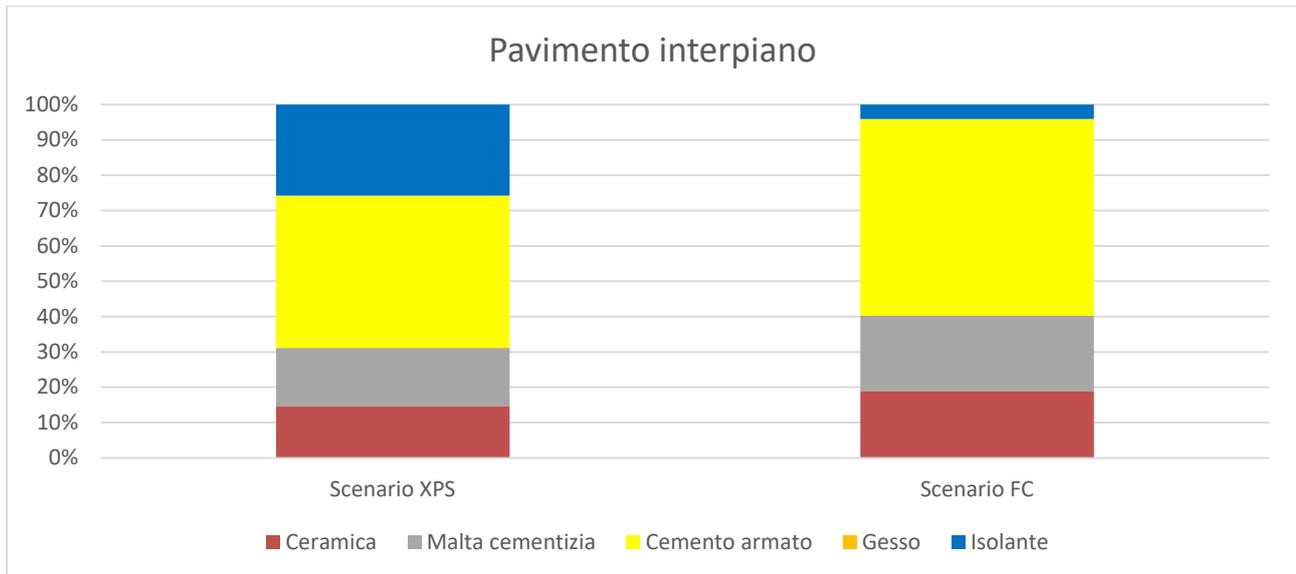


Figura 43 Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono il pavimento di interpiano – Scenari XPS e FC

In entrambi gli scenari il componente che contribuisce in misura maggiore all'impatto è il cemento armato, che rappresenta rispettivamente il 43% dell'EE nello scenario XPS e il 56% nello scenario FC.

La malta cementizia rappresenta rispettivamente il 16% dell'EE nello scenario XPS e il 21% nello scenario FC.

L'isolante incide sull'EE per il 26% nello scenario XPS e per il 4% nello scenario FC.

Nello scenario FC l'EE si riduce complessivamente del 22%.

Pareti perimetrali verticali

Nella figura 44 è illustrata l'incidenza dei materiali delle pareti perimetrali invernali sull'EE negli scenari XPS e FC.

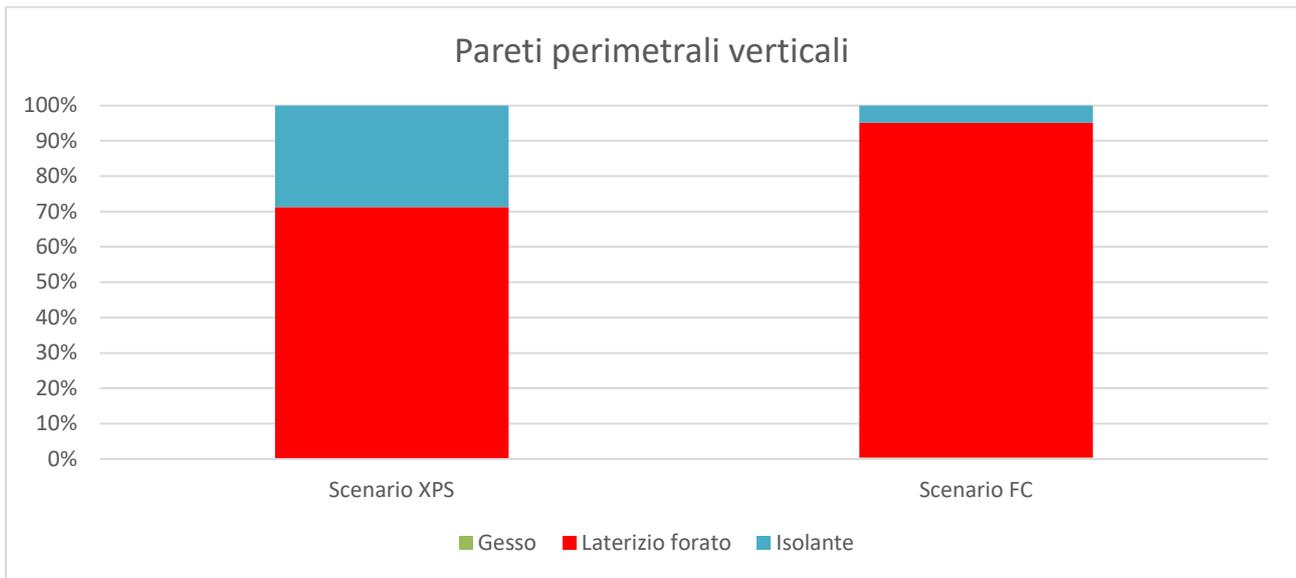


Figura 44. Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono le pareti perimetrali verticali – Scenari XPS e FC

In entrambi gli scenari, il componente che contribuisce in misura maggiore all'impatto è il laterizio forato che rappresenta rispettivamente il 71% dell'EE nello scenario XPS e il 95% nello scenario FC. L'isolante incide sull'EE per il 29% nello scenario XPS e per il 5% nello scenario FC. Nello scenario FC l'EE si riduce del 22%.

Aperture finestrate e pareti divisorie interne

Nelle figure 45 e 46 è illustrata l'analisi dell'EE dei materiali che costituiscono pareti divisorie interne e le aperture finestrate.

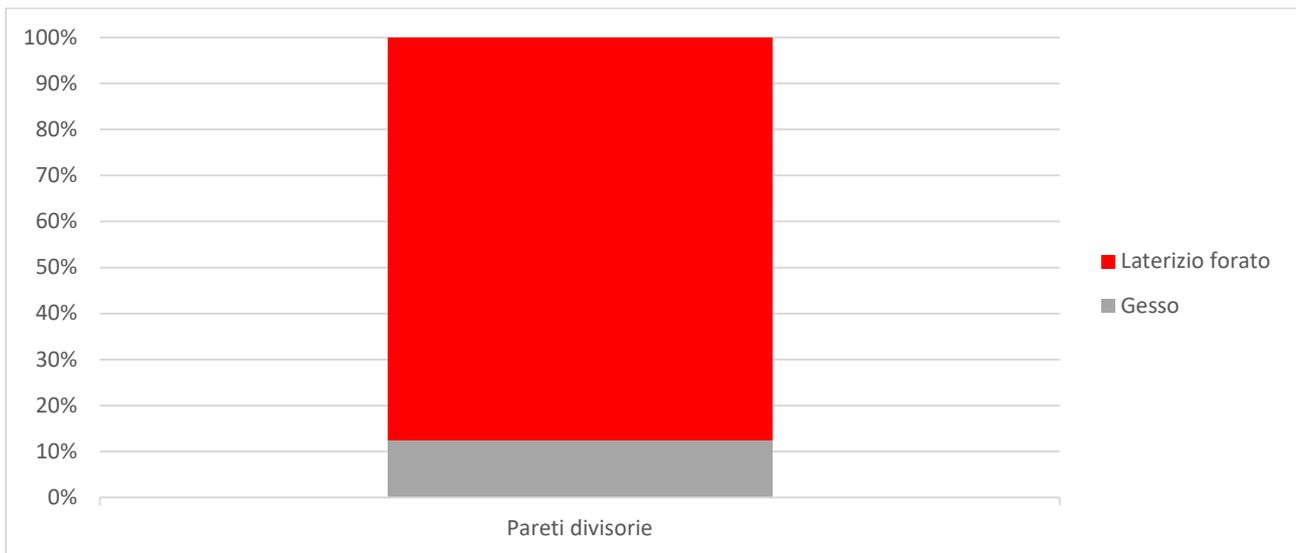


Figura 45. Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono le pareti divisorie interne

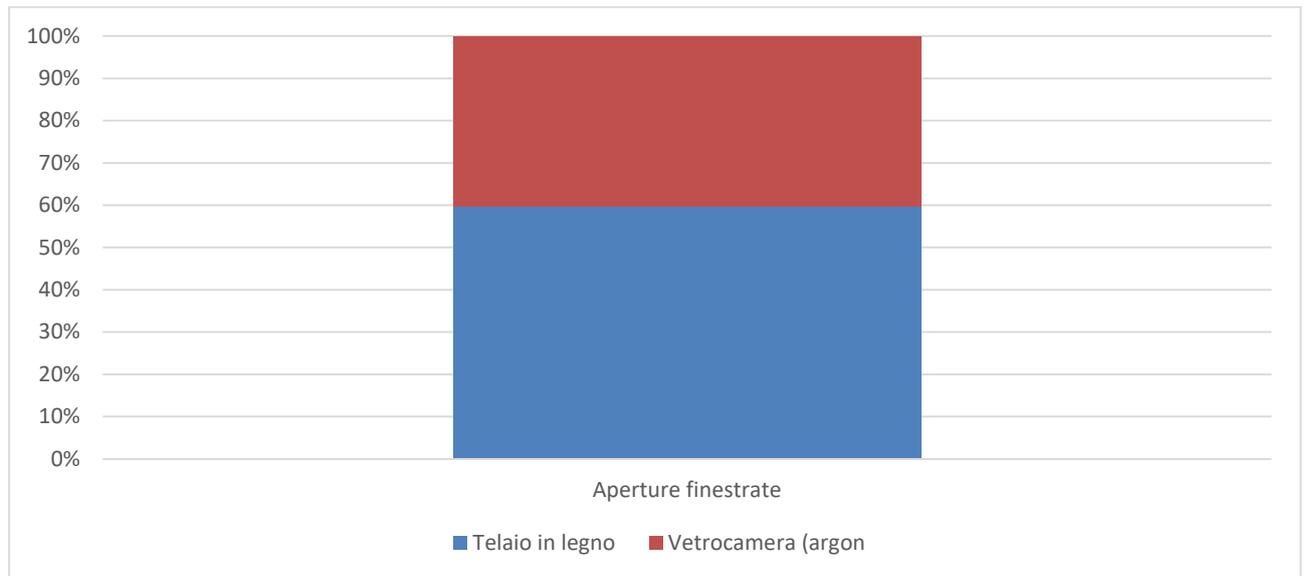


Figura 46. Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono le aperture finestrate

I materiali che contribuiscono in misura maggiore all' impatto sono:

- il laterizio forato, che è responsabile per l'88% dell'EE nelle pareti divisorie;
- il telaio, che è responsabile per il 60% dell'EE nelle aperture finestrate.

Impatti ambientali – Componenti d'involucro

Nella tabella 31 sono sintetizzati gli impatti ambientali connessi all'involucro edilizio per entrambi gli scenari esaminati e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto a quelli dello scenario XPS.

Tabella 31 Modulo A: Impatti ambientali nei componenti d'involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria d'impatto	Unità di riferimento	Scenario XPS	Scenario FC
Climate change	GWP (kg CO _{2eq})	3,31E+05	2,95E+05
Climate change – Fossil	GWP _f (kg CO _{2eq})	3,45E+05	3,11E+05
Climate change – Biogenic	GWP _b (kg CO _{2eq})	-1,41E+04	-1,57E+04
Climate change – Land use and LU change	GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,12E+02	3,16E+02

Lo scenario FC presenta prestazioni ambientali migliori di circa il 10-11% ad eccezione della categoria "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo in cui si osserva un incremento dell'1 %. Ciò è dovuto principalmente all'impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa che ha un impatto maggiore rispetto al polistirene espanso estruso su questa categoria d'impatto. I maggiori benefici ambientali connessi all'uso dell'isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso si hanno invece in corrispondenza delle seguenti categorie: "cambiamento climatico" e "cambiamento climatico – contributo fossile", in cui l'impatto si riduce, rispettivamente, del 11% e del 10%. I valori dell'impatto sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" sono negativi con valori migliori per lo scenario FC.

L'analisi dei contributi dei componenti di involucro per le categorie d'impatto esaminate è fornita nelle tabelle 32 e 33.

Tabella 32 Contributo dei componenti d'involucro agli impatti ambientali – Scenario XPS

Categoria d'impatto	Aperture finestrate	Porte interne e porta esterna	Copertura esterna	Pareti perimetrali verticali	Pareti divisorie interne	Pavimento contro terra	Pavimento di interpiano
GWP (kg CO _{2eq})	1,96E+03	-3,15E+03	5,69E+04	2,13E+04	2,05E+03	1,55E+05	9,73E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,42E+03	3,99E+03	5,80E+04	2,75E+04	2,93E+03	1,52E+05	9,52E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-3,54E+03	-7,23E+03	-1,16E+03	-6,19E+03	-8,82E+02	2,84E+03	2,07E+03
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	8,79E+01	9,95E+01	2,58E+01	8,14E+00	9,74E-01	5,55E+01	3,40E+01

Tabella 33 Contributo dei componenti d'involucro agli impatti ambientali – Scenario FC

Categoria d'impatto	Aperture finestrate	Porte interne e porta esterna	Copertura esterna	Pareti perimetrali verticali	Pareti divisorie interne	Pavimento contro terra	Pavimento di interpiano
GWP (kg CO _{2eq})	1,96E+03	-3,15E+03	4,42E+04	1,51E+04	2,05E+03	1,47E+05	8,82E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,42E+03	3,99E+03	4,59E+04	2,16E+04	2,93E+03	1,45E+05	8,65E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-3,54E+03	-7,23E+03	-1,73E+03	-6,51E+03	-8,82E+02	2,48E+03	1,68E+03
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	8,79E+01	9,95E+01	2,72E+01	8,88E+00	9,74E-01	5,63E+01	3,48E+01

Per un'analisi più immediata, il contributo agli impatti analizzati nelle tabelle 32 e 33 di ogni componente edile è illustrato nei grafici riportati in figura 47-49-51 e in figura 48-50-52, rispettivamente, per gli scenari XPS e FC.

Nelle figure 47 e 48 sono illustrate gli impatti relativi alla categoria GWP complessiva associati ai componenti d'involucro degli scenari XPS e FC.

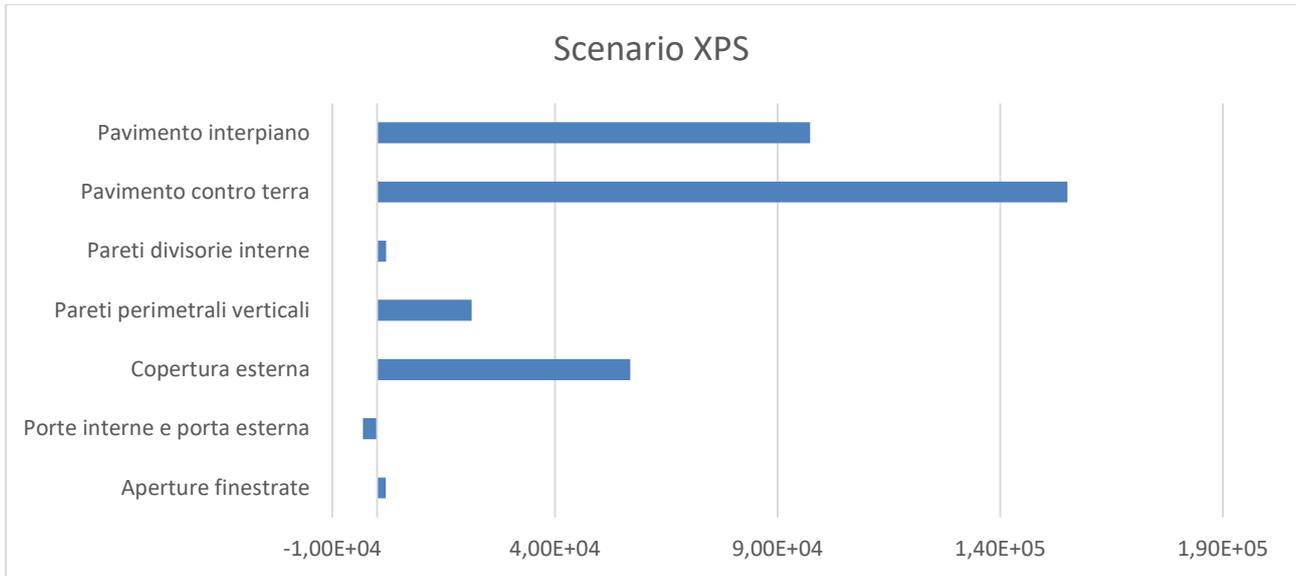


Figura 47 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti di involucro al GWP – Scenario XPS

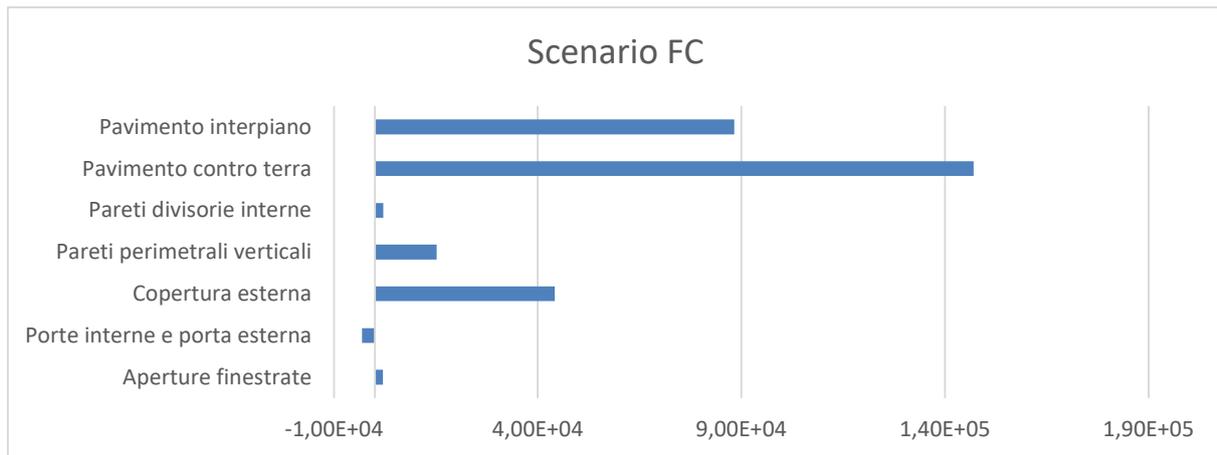


Figura 48. Modulo A: Analisi del contributo dei componenti di involucro al GWP – Scenario FC

In entrambi gli scenari il contributo maggiore al global warning è dato dal pavimento controterra, a causa dell'elevato contenuto di cemento armato mentre le porte interne e la porta esterna contribuiscono negativamente all'impatto per la CO₂ biogenica assorbita dalla pianta impiegata per la produzione del legno. Nelle figure 49 e 50 sono illustrate gli impatti relativi alle categorie GWP_f e GWP_{LULUC} associati ai componenti d'involucro negli scenari XPS e FC.

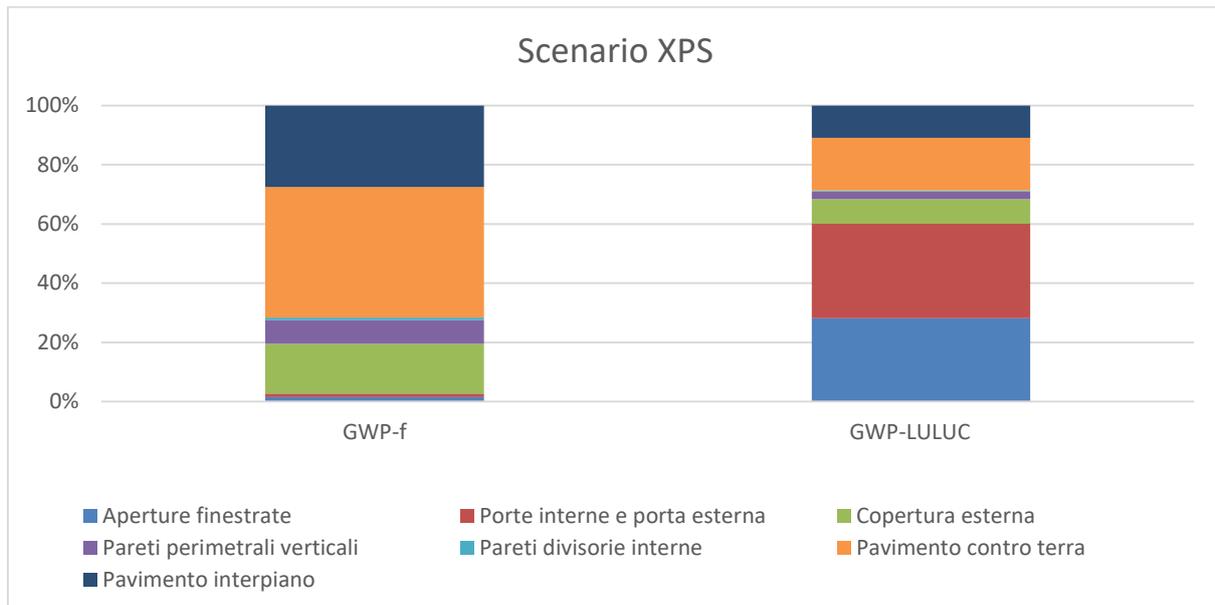


Figura 49 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti di involucro al GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario XPS

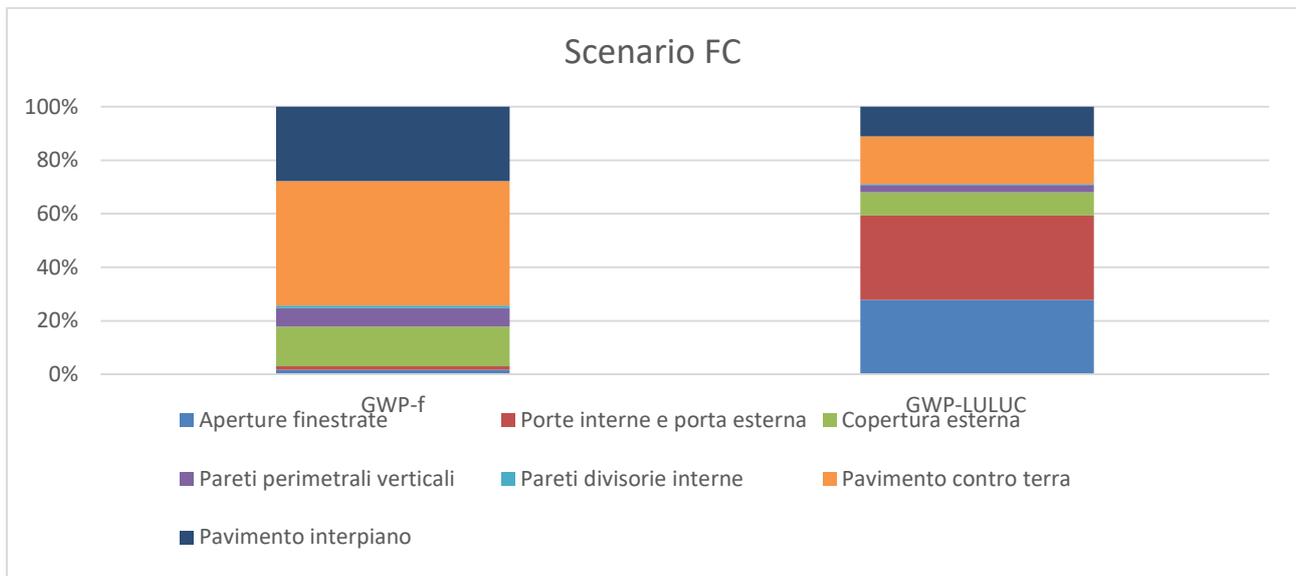


Figura 50 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti di involucro al GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario FC

Nella categoria d'impatto ambientale GWP_f , in entrambi gli scenari, il contributo maggiore è dato dal componente pavimento controterra principalmente a causa dell'impatto del cemento armato mentre nella categoria GWP_{LULUC} il contributo maggiore è imputabile alle porte, poiché il legno che le costituisce ha un elevato contributo all'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo.

Nelle figure 51 e 52 sono illustrati gli impatti relativi alla categoria GWP_b dei componenti d'involucro negli scenari XPS e FC.

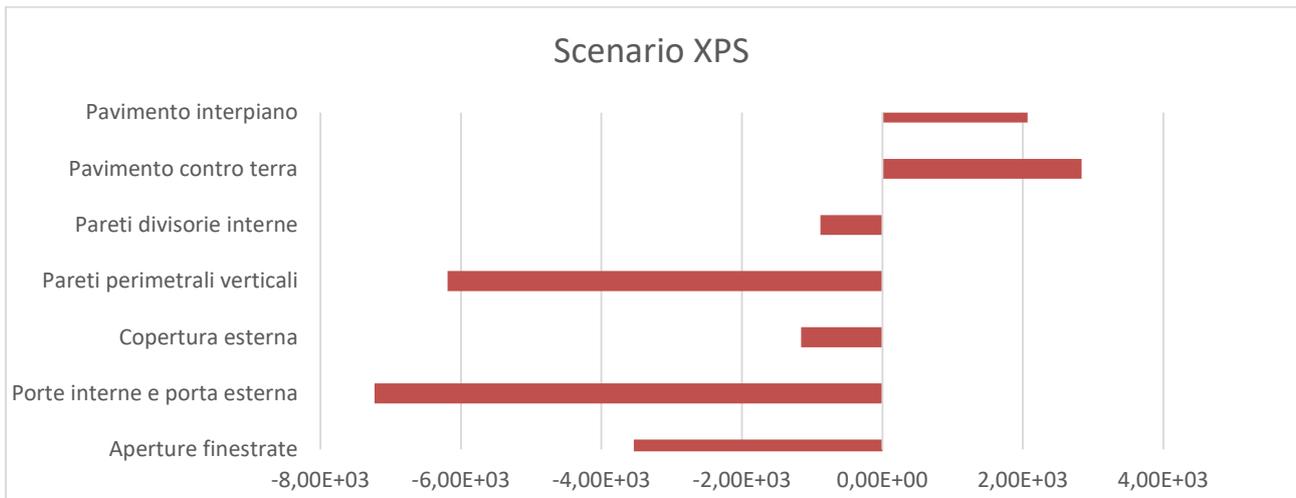


Figura 51 Modulo A: Contributo dei componenti d'involucro al GWP_b – Scenario XPS

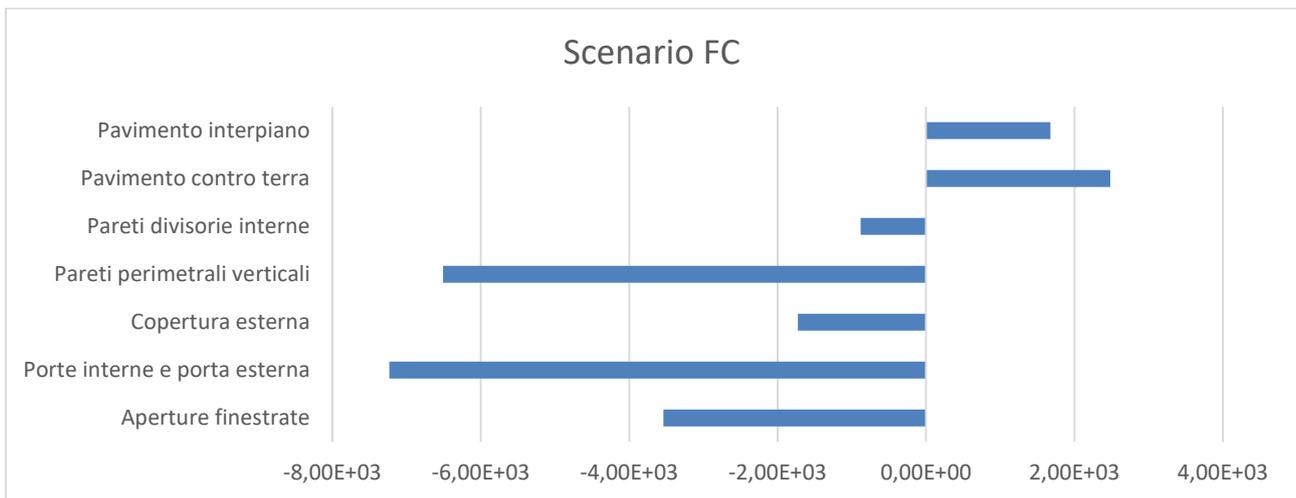


Figura 52 Modulo A: Contributo dei componenti d'involucro al GWP_b – Scenario FC

In entrambi gli scenari la maggior parte dei contributi alla categoria d'impatto sono negativi e il contributo negativo maggiore è dato dalle porte costituite principalmente in legno.

Di seguito è descritta un'analisi dettagliata dei componenti edili, che ha consentito di identificare i materiali responsabili del maggior contributo agli impatti ambientali.

Pavimento controterra

Nelle figure 53 e 54 sono illustrati gli impatti relativi alle categorie GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti del pavimento controterra negli scenari XPS e FC.

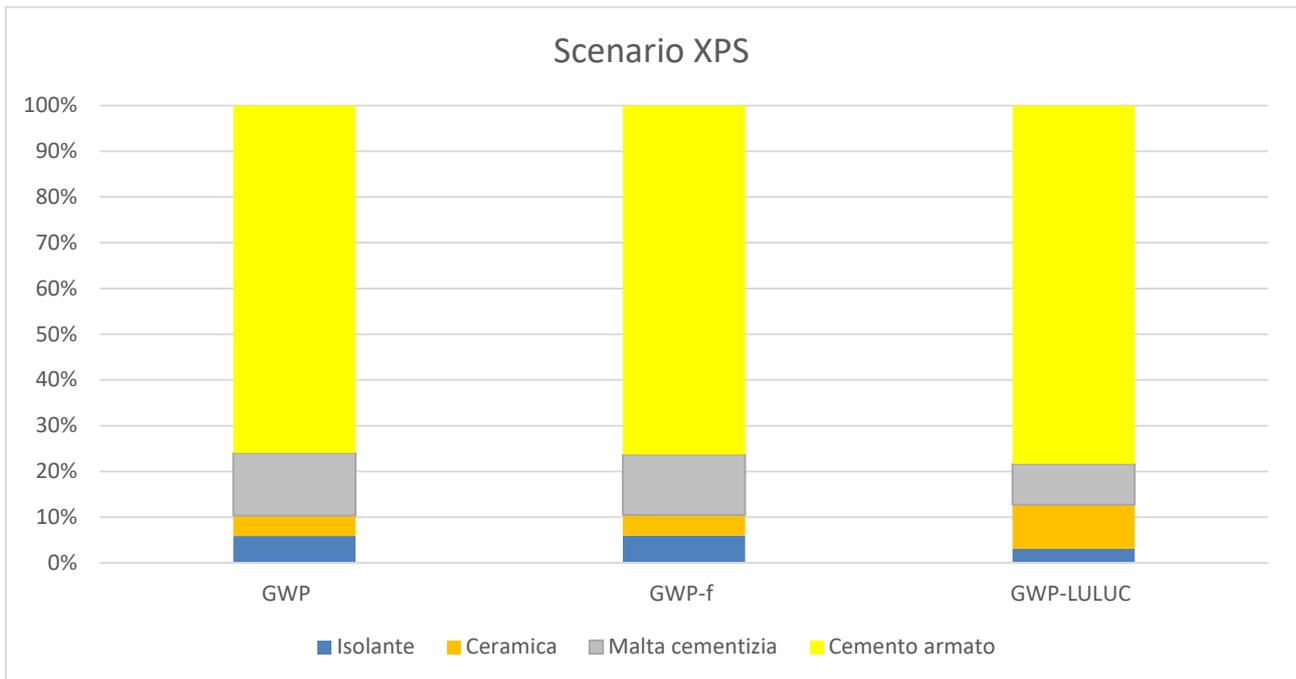


Figura 53 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono il pavimento controterra– Scenario XPS

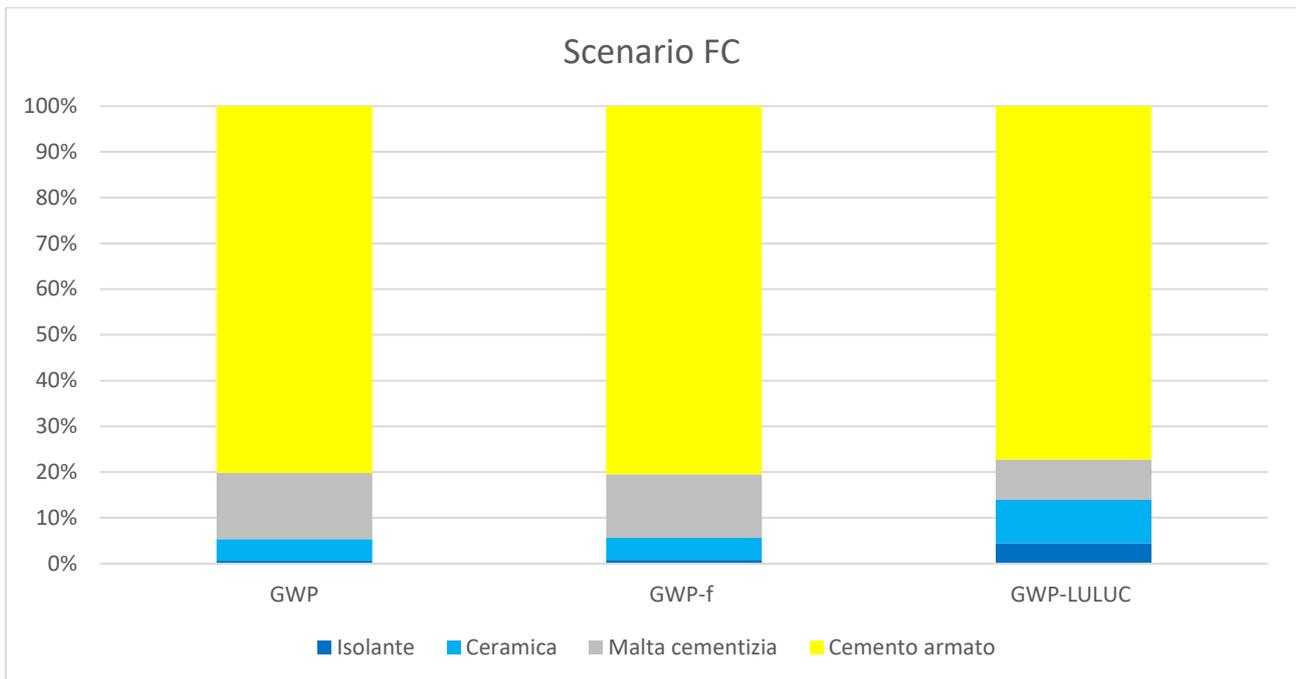


Figura 54 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono il pavimento controterra– Scenario FC

In entrambi gli scenari la maggior parte dei contributi all’impatto sono dovuti al cemento armato (circa il 75% nello scenario XPS e circa l’80% nello scenario FC).

Inoltre, l’isolante incide per il 6% nelle categorie GWP e GWP_f e incide per il 3% nella categoria GWP_{LULUC} nello scenario XPS mentre nello scenario FC incide per l’1% nel GWP e GWP_f e per il 4% nel GWP_{LULUC}.

Nelle figure 55 e 56 sono illustrati gli impatti relativi alla categoria GWP_b del pavimento controterra negli scenari XPS e FC.

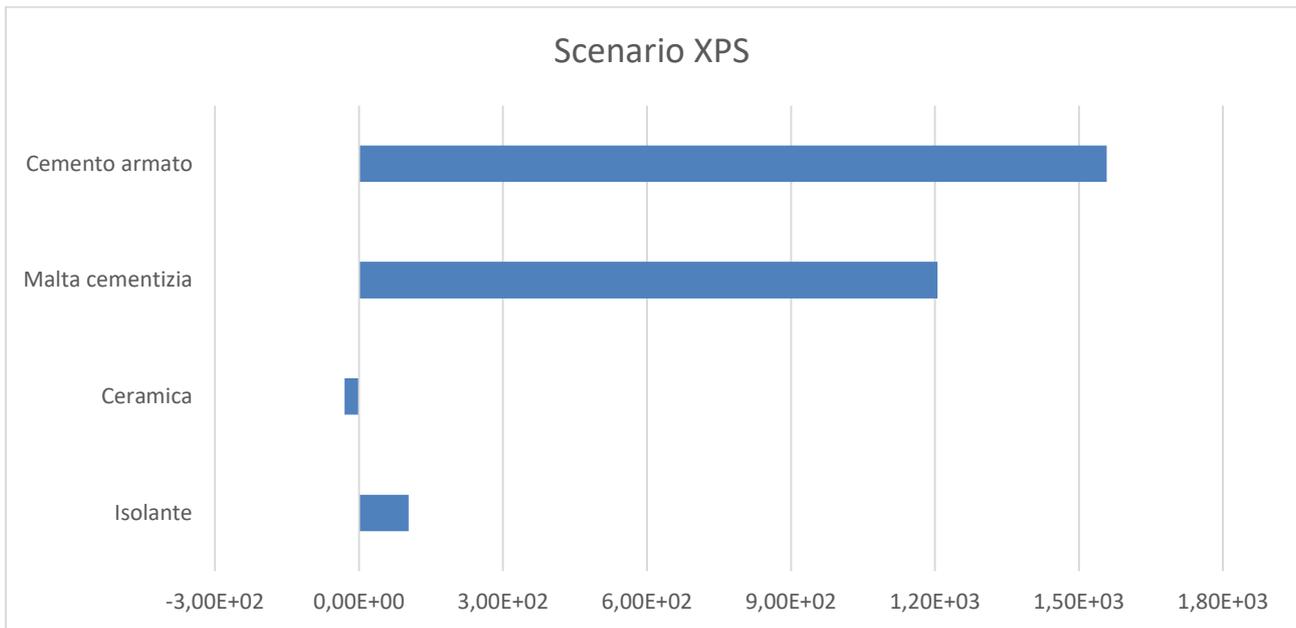


Figura 55 Contributo dei componenti del pavimento controterra al GWP_b – Scenario XPS

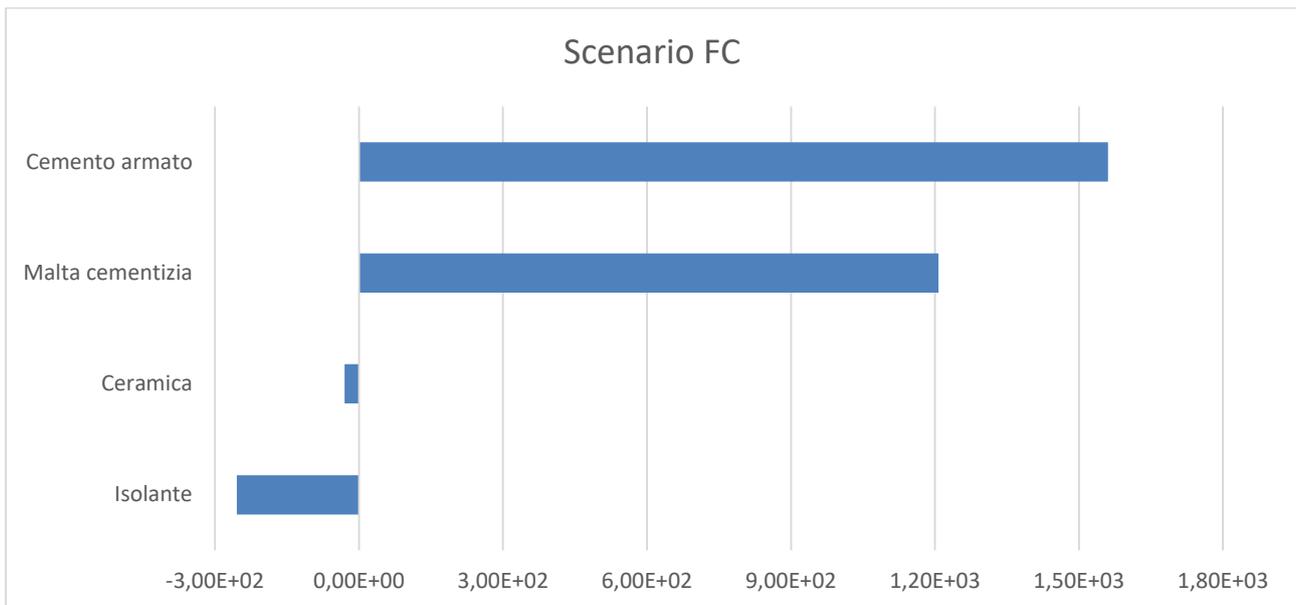


Figura 56 Contributo dei componenti del pavimento controterra al GWP_b – Scenario FC

In entrambi gli scenari la maggior parte dei contributi all'impatto sono dovuti al cemento armato e alla malta cementizia.

Inoltre, l'isolante in fibra cellulosa ha un impatto negativo, così come è negativo l'impatto della ceramica.

Pavimento di interpiano

Nelle figure 57 e 58 sono illustrati gli impatti relativi alle categorie GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti del pavimento di interpiano negli scenari XPS e FC.

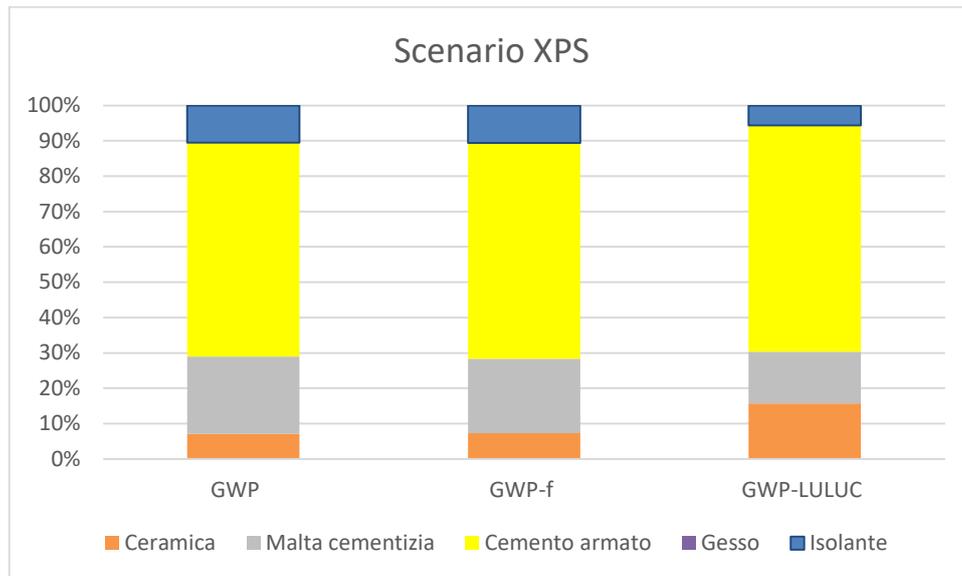


Figura 57 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono il pavimento di interpiano– Scenario XPS

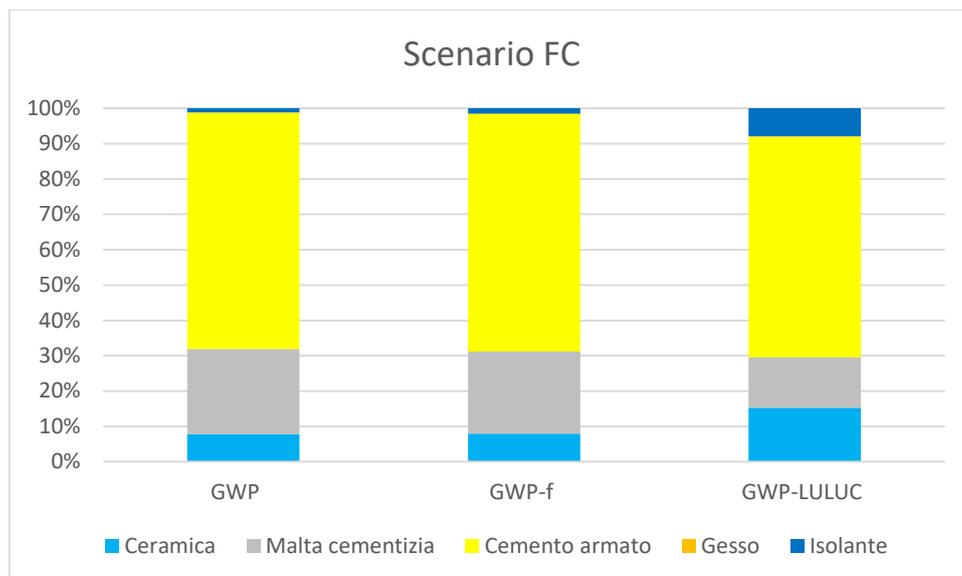


Figura 58 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono il pavimento di interpiano– Scenario FC

In entrambi gli scenari la maggior parte dei contributi all’impatto sono dovuti al cemento armato e alla malta cementizia.

L’isolante nello scenario XPS incide per il 6% nella categoria GWP_{LULUC} e per il 10% e 11% rispettivamente per le categorie GWP e GWP_f mentre nello scenario FC incide per l’1% nelle categorie GWP e GWP_f e per l’8% nella categoria GWP_{LULUC} .

Nelle figure 59 e 60 sono illustrati gli impatti relativi alla categoria GWP_b del pavimento di interpiano negli scenari XPS e FC.

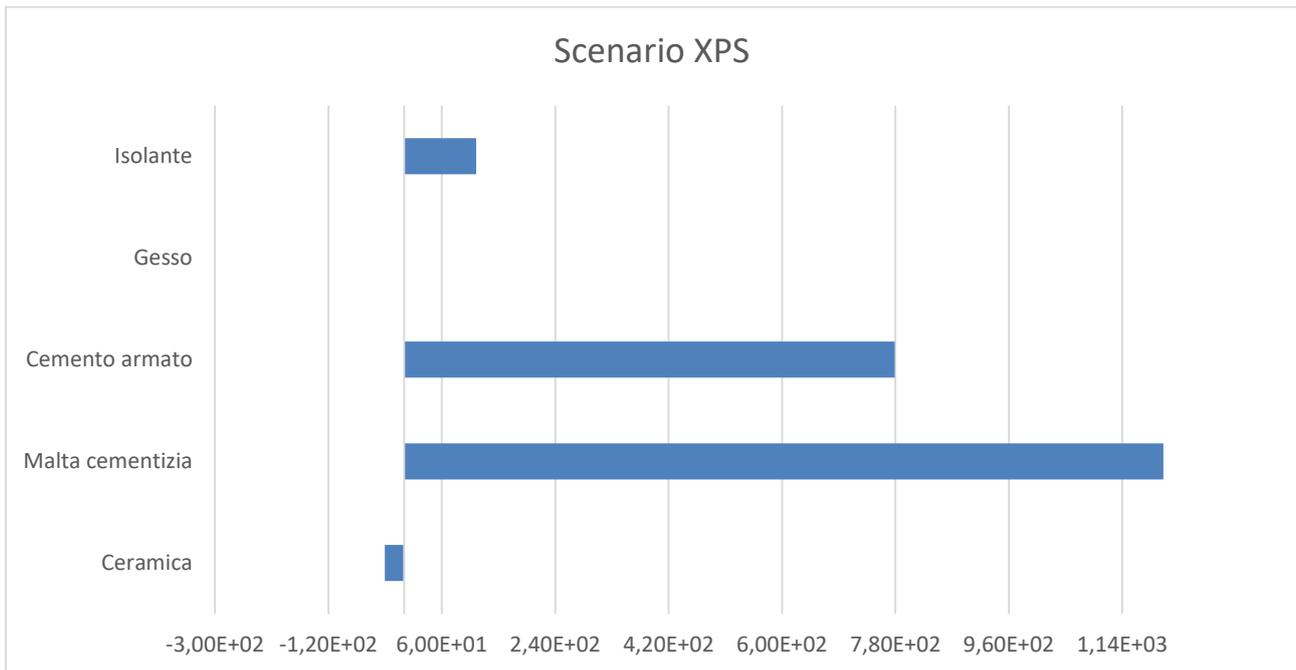


Figura 59 Contributo dei componenti del pavimento di interpiano al GWP_b – Scenario XPS

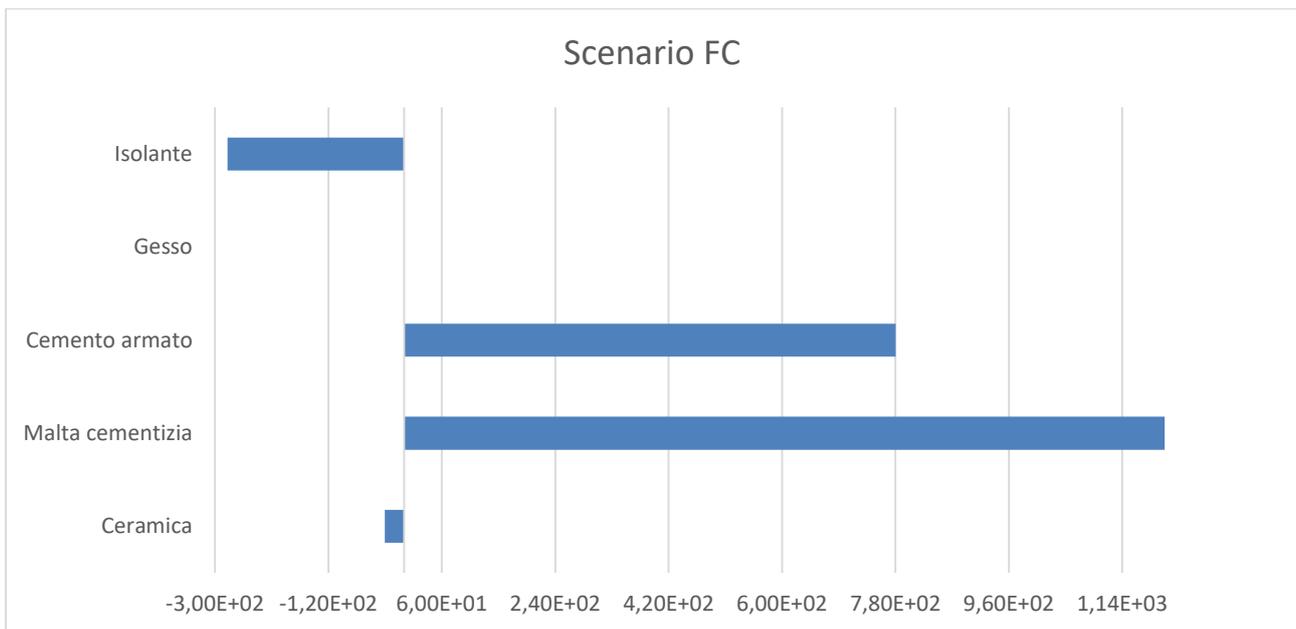


Figura 60 Contributo dei componenti del pavimento di interpiano al GWP_b – Scenario FC

I risultati mostrano che la malta cementizia causa il maggiore impatto così come la ceramica e che l'isolante in fibra cellulosa(origine naturale) ha un impatto negativo, così come la ceramica.

Copertura esterna

Nelle figure 61 e 62 sono illustrati gli impatti relativi alle categorie GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti della copertura esterna negli scenari XPS e FC.

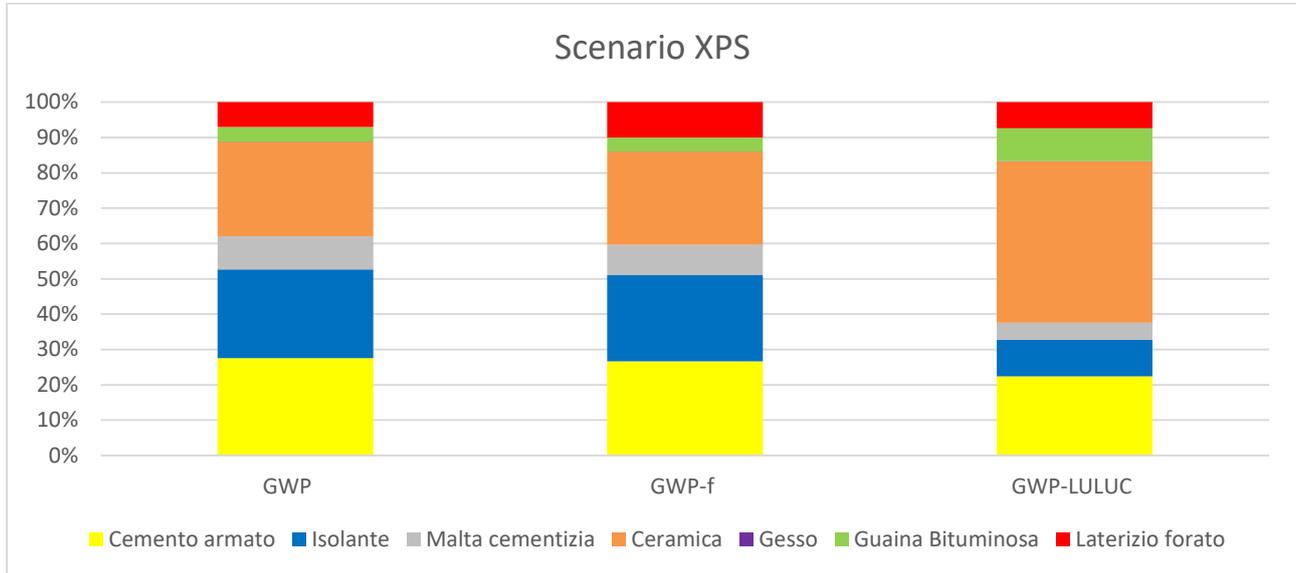


Figura 61 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono la copertura esterna– Scenario XPS

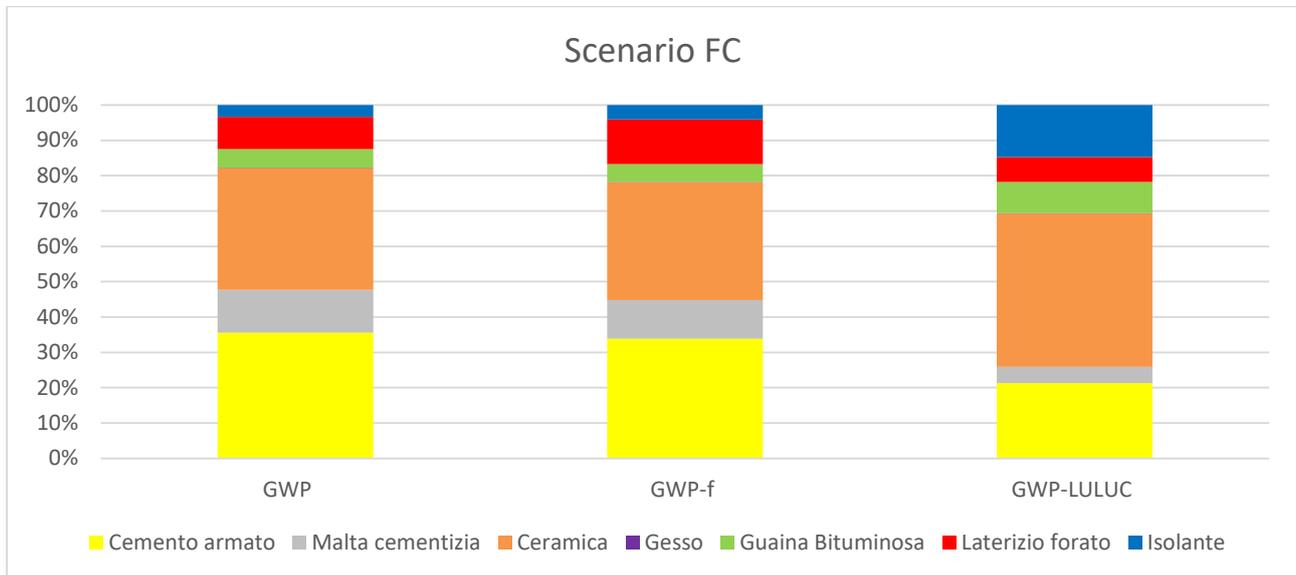


Figura 62 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono la copertura esterna– Scenario FC

I risultati mostrano che la maggior parte dei contributi agli impatti in entrambi gli scenari sono dovuti principalmente alla ceramica e al cemento armato. In dettaglio, nello scenario XPS il cemento armato incide per il 22% nel GWP_{LULUC} e per il 28% e 27% rispettivamente per il GWP e il GWP_f mentre nello scenario FC incide per il 21% nel GWP_{LULUC} e per il 36% e 34% rispettivamente per il GWP e il GWP_f.

L'isolante nello scenario XPS incide per il 10% nel GWP_{LULUC} e per il 25% e 24% rispettivamente per il GWP e il GWP_f mentre nello scenario FC incide per il 15% nel GWP_{LULUC} e per il 3% e 4% rispettivamente per il GWP e il GWP_f .

Nelle figure 63 e 64 sono illustrate gli impatti relativi alla categoria GWP_b della copertura esterna negli scenari XPS e FC.

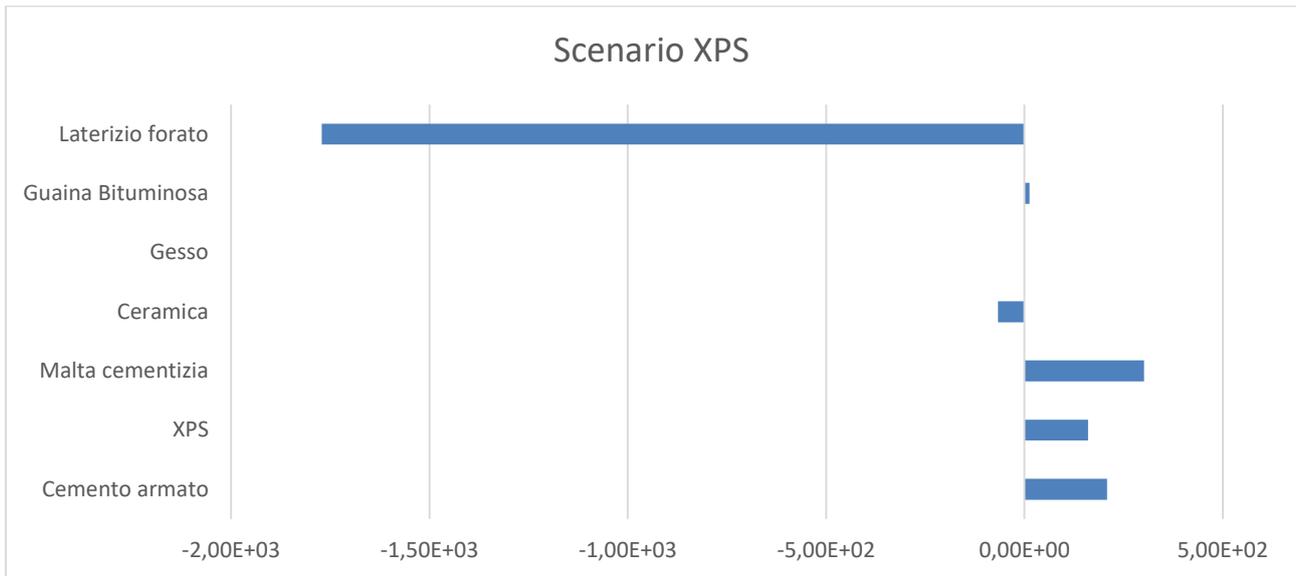


Figura 63 Contributo dei componenti della copertura esterna al GWP_b – Scenario XPS

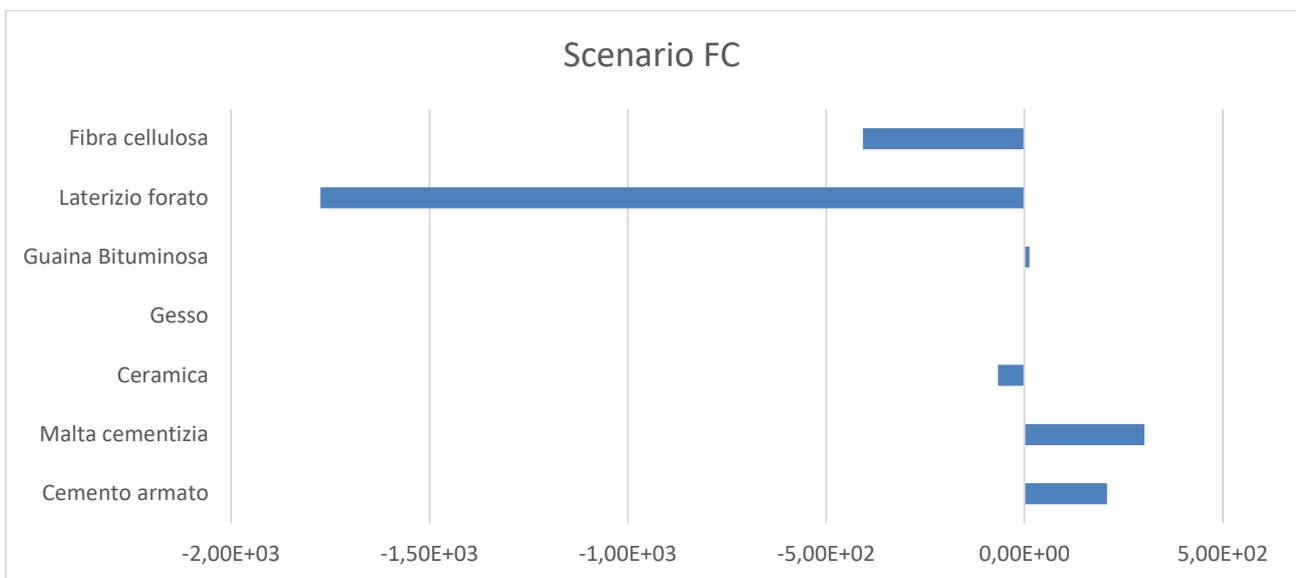


Figura 64 Contributo dei componenti della copertura esterna al GWP_b – Scenario FC

In entrambi gli scenari il contributo maggiore per la categoria d’impatto ambientale GWP_b è negativo ed è dovuto principalmente alla catena produttiva del laterizio forato.

Pareti perimetrali verticali

Nelle figure 65 e 66 sono illustrati gli impatti relativi alle categorie GWP , GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti delle pareti perimetrali verticali negli scenari XPS e FC.

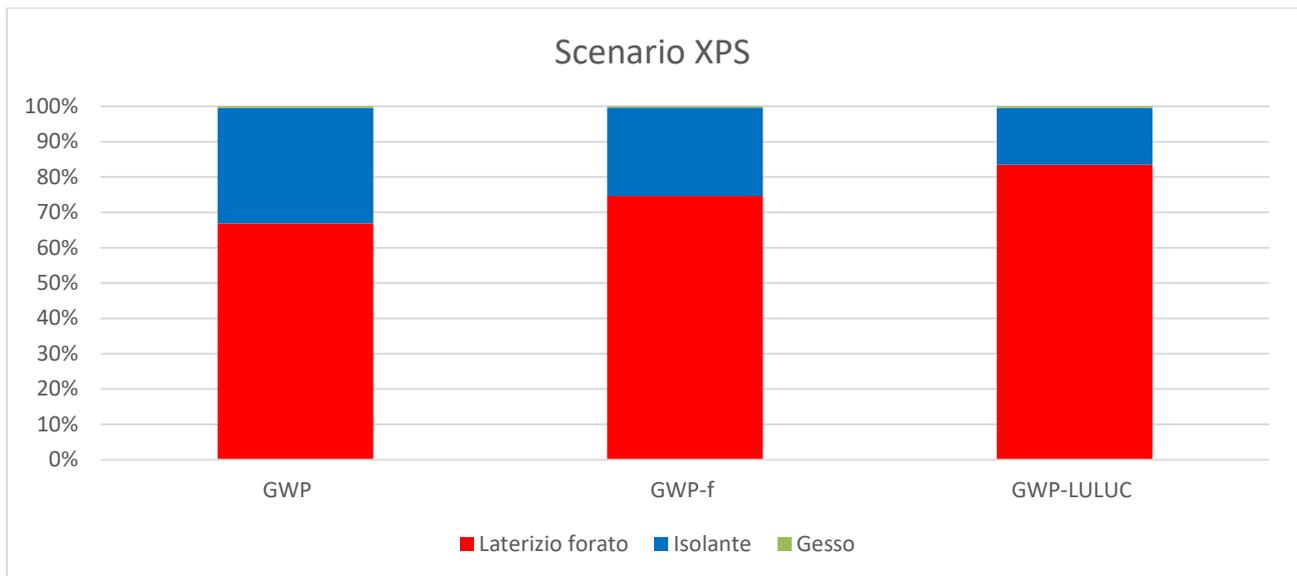


Figura 65 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti perimetrali verticali – Scenario XPS

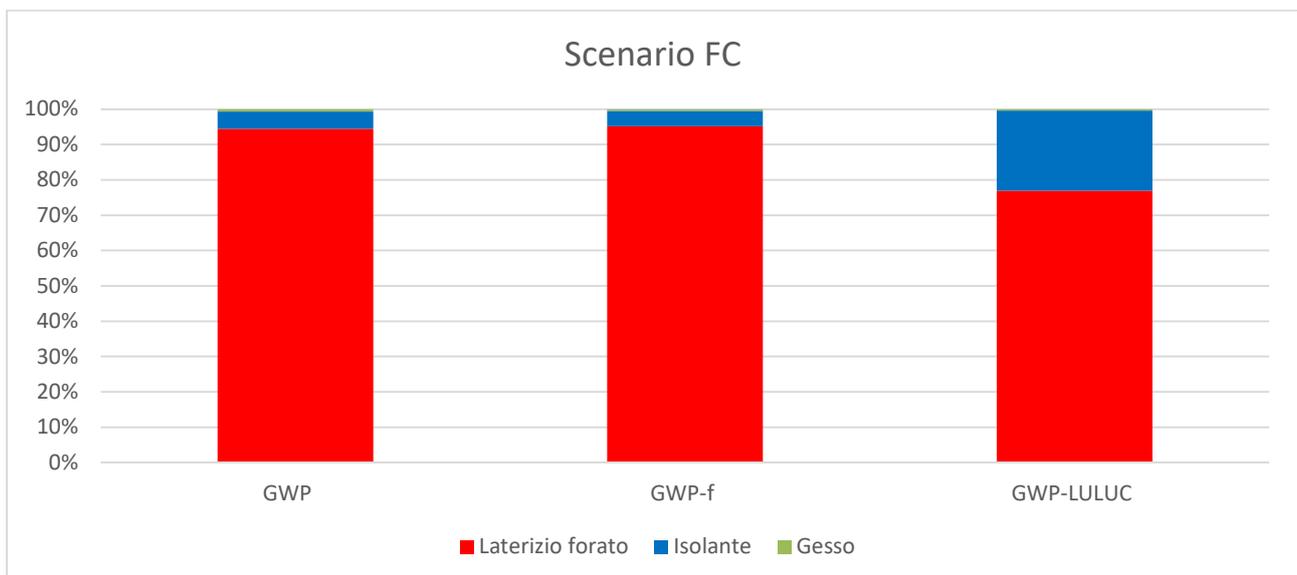


Figura 66 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti perimetrali verticali – Scenario FC

La maggior parte dei contributi agli impatti alle categorie d’impatto GWP , GWP_f e GWP_{LULUC} è dovuto al laterizio forato che incide nello scenario XPS per il 67% nel GWP e il 75% nel GWP_f e nello scenario FC incide per il 94% nel GWP e il 95% nel GWP_f e per il 77% nel GWP_{LULUC} .

L'isolante nello scenario XPS incide per il 16% nel GWP_{LULUC} e per il 33% e 25% rispettivamente per il GWP e il GWP_f mentre nello scenario FC incide per il 23% nel GWP_{LULUC} e per il 5% e 4% rispettivamente per il GWP e il GWP_f .

Nelle figure 67 e 68 sono illustrate gli impatti relativi alla categoria GWP_b delle pareti perimetrali verticali negli scenari XPS e FC.

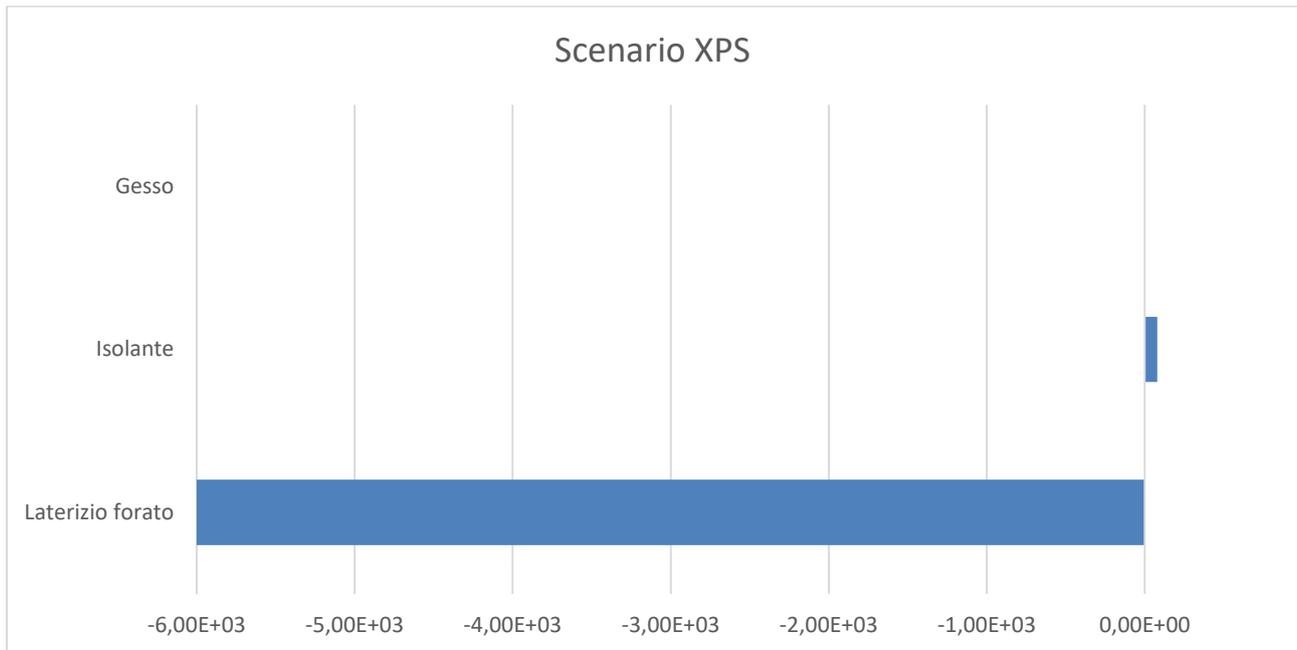


Figura 67 Contributo dei componenti delle pareti perimetrali verticali al GWP_b – Scenario XPS

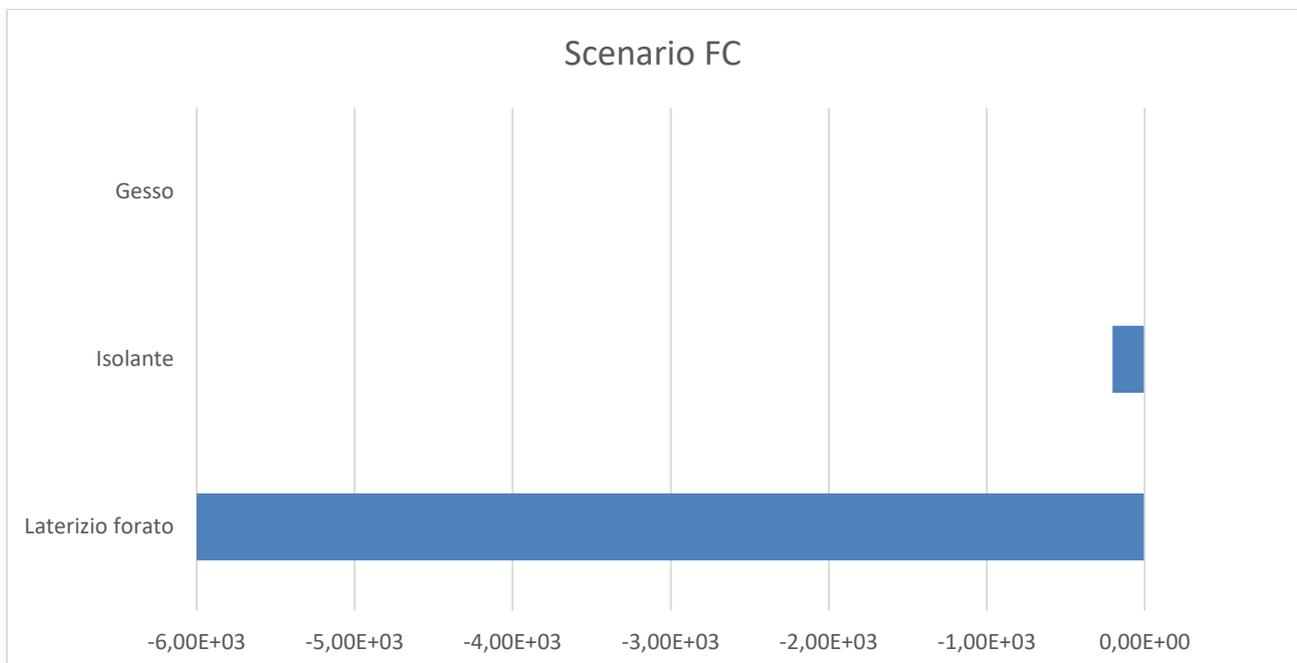


Figura 68 Contributo dei componenti delle pareti perimetrali verticali al GWP_b – Scenario FC

in entrambi gli scenari il contributo maggiore è negativo ed è dovuto principalmente al laterizio forato. Inoltre, nello scenario FC anche l'isolante contribuisce negativamente all'impatto.

Aperture finestrate

Nelle figure 69- 71 sono illustrati gli impatti relativi alle categorie delle aperture finestrate negli scenari XPS e FC.

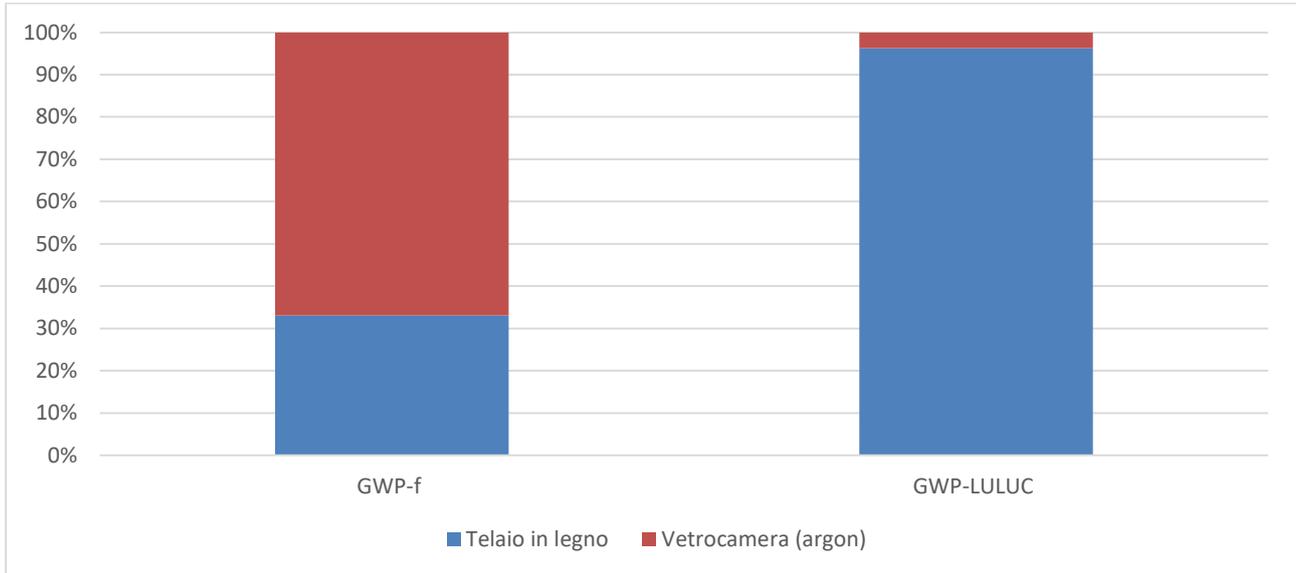


Figura 69 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le aperture finestrate – Scenario XPS-FC

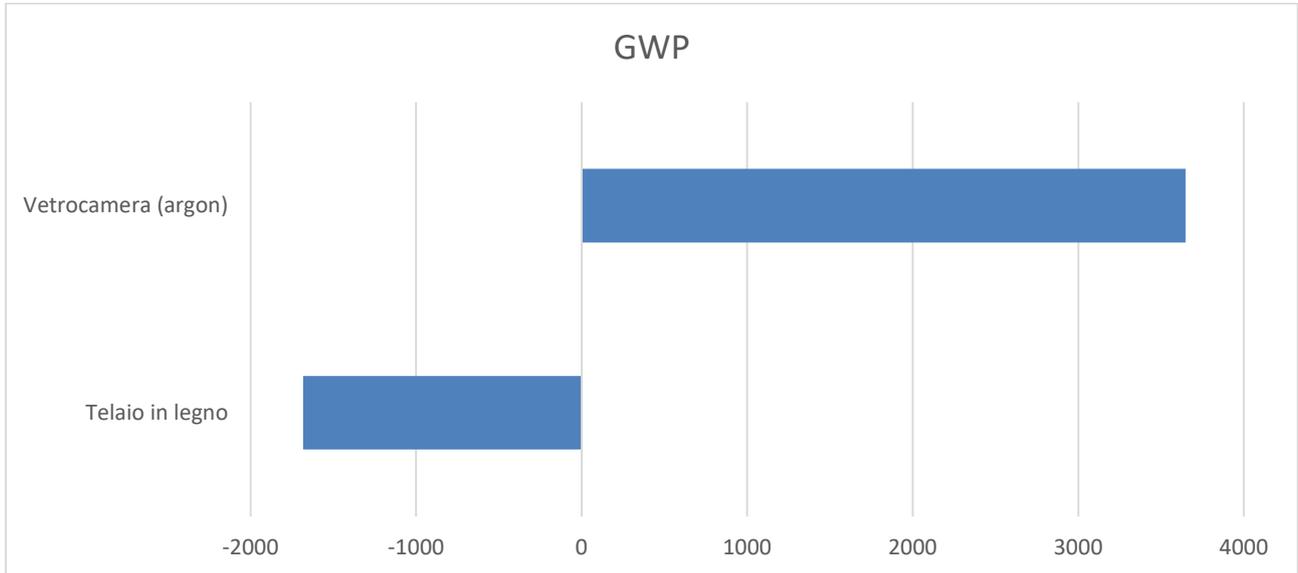


Figura 70 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le aperture finestrate – Scenario XPS-FC

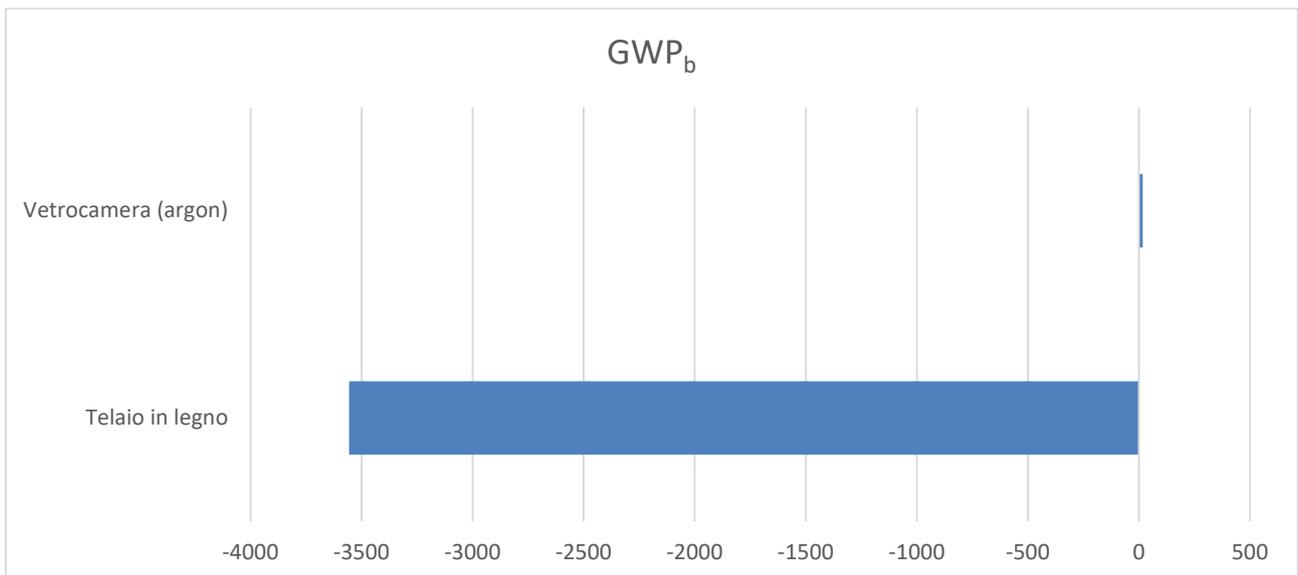


Figura 71 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le aperture finestrate – Scenario XPS-FC

Nelle aperture finestrate il contributo maggiore agli impatti del GWP_f è dato dal vetrocamera mentre nel GWP_{LULUC} ed è dovuto principalmente al telaio. Inoltre il telaio ha un impatto negativo sul GWP e al GWP_b .

Pareti divisorie interne

Nelle figure 72 e 73 sono illustrati gli impatti relativi alle categorie delle pareti divisorie interne negli scenari XPS e FC.

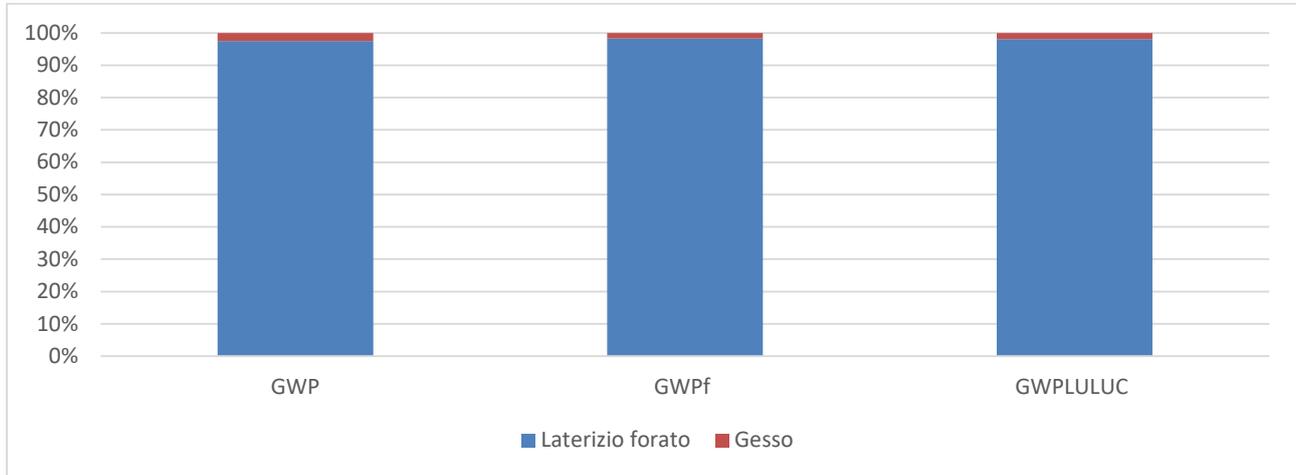


Figura 72 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti divisorie interne– Scenario XPS-FC

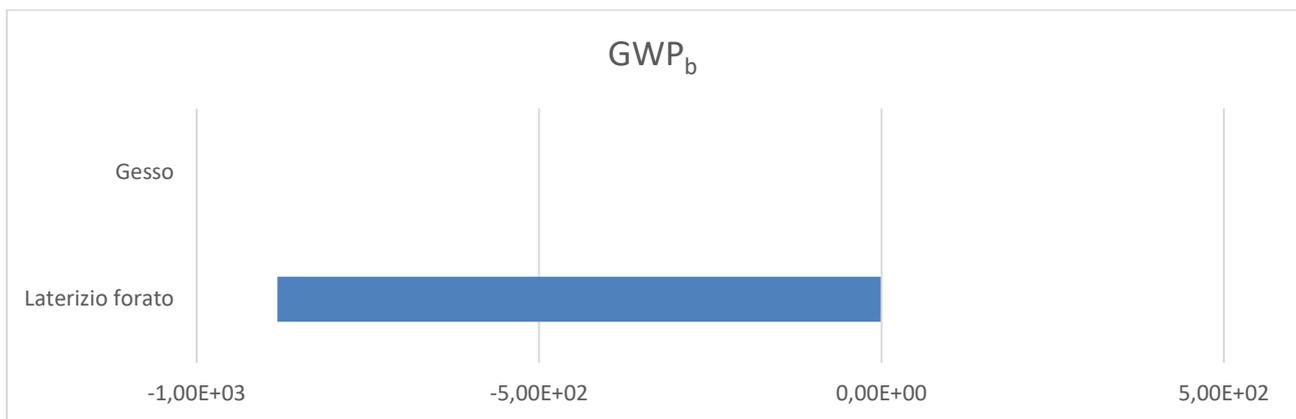


Figura 73 Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti divisorie interne– Scenario XPS-FC

I risultati mostrano che la quasi totalità dei contributi alle categorie d’impatto GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} è dovuto al laterizio forato, mentre nel GWP_b questo componente ha un impatto negativo.

Porte interne e porta esterna

Le porte interne e la porta esterna hanno un impatto trascurabile in tutte le categorie ambientali esaminate tranne che sull’impatto sul “cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”).

Per le porte interne e per la porta esterna i materiali responsabili del maggiore contributo all’impatto sono:

- la vernice alchidica, che presenta un’incidenza pari all’84% sulla categoria cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”;
- Il legno tenero, che grazie alla CO₂ sottratta dall’atmosfera determina un contributo negativo sul “cambiamento climatico”.

Energia incorporata – Componenti d’impianto

Nella tabella 34 sono sintetizzati i valori di energia incorporata dell’impianto di climatizzazione costituito da: due unità esterne VRF, 25 unità interne ad espansione diretta e un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) e dell’impianto fotovoltaico negli scenari con e senza accumulo elettrico.

Tabella 34 Modulo A: Energia incorporata nei componenti d’impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria	Scenario cAE	Scenario sAE
EE (MJ)	1,75E+06	1,64E+06
Eenr (MJ)	1,53E+06	1,44E+06
Eer (MJ)	2,14E+05	2,05E+05

Nello scenario cAE l’energia incorporata nei componenti d’impianto analizzati è pari a 1,75E+06 MJ di energia primaria di cui l’88% costituito da energia primaria non rinnovabile mentre nello scenario sAE l’energia incorporata nei componenti d’impianto analizzati è pari a 1,64E+06 MJ di energia primaria di cui l’88% costituito da energia primaria non rinnovabile.

L’installazione di un accumulo elettrico (Scenario cAE) causa, rispetto allo scenario senza accumulo, un incremento dell’energia incorporata totale del 6% e rispettivamente un incremento di energia primaria non rinnovabile e rinnovabile del 6% e del 4%.

Nelle figure 74 e 75 è illustrata, rispettivamente, l’incidenza dei componenti dell’impianto sull’EE nei due scenari sopracitati.

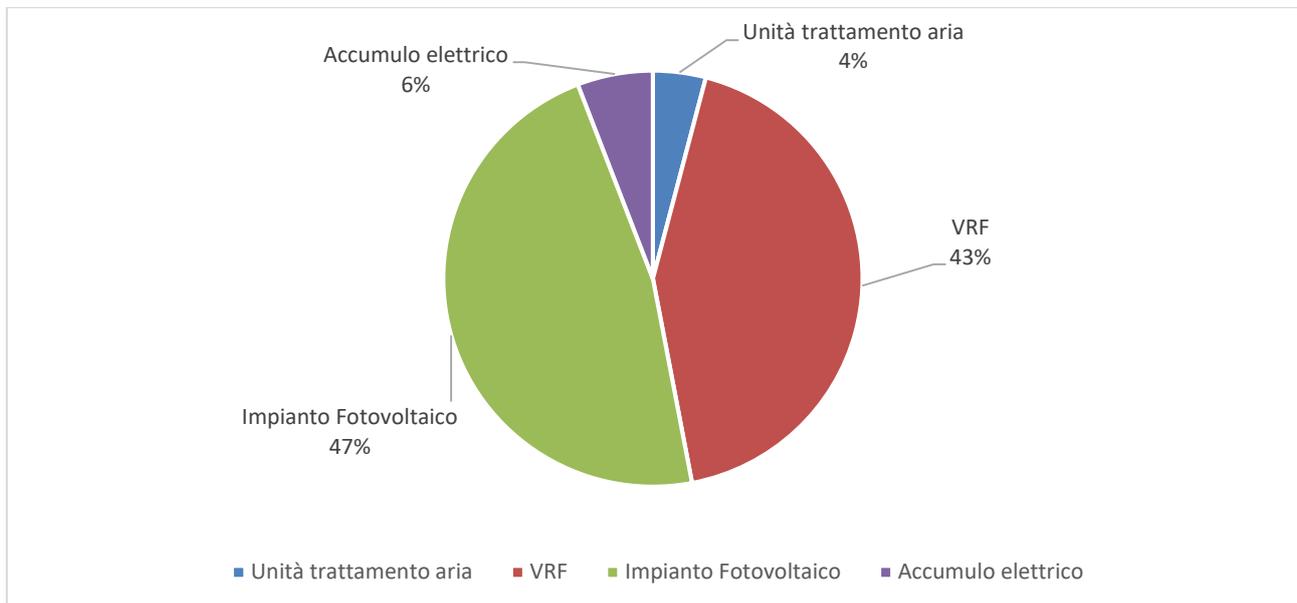


Figura 74. Modulo A: Incidenza dei componenti d’impianto sull’EE – Scenario cAE

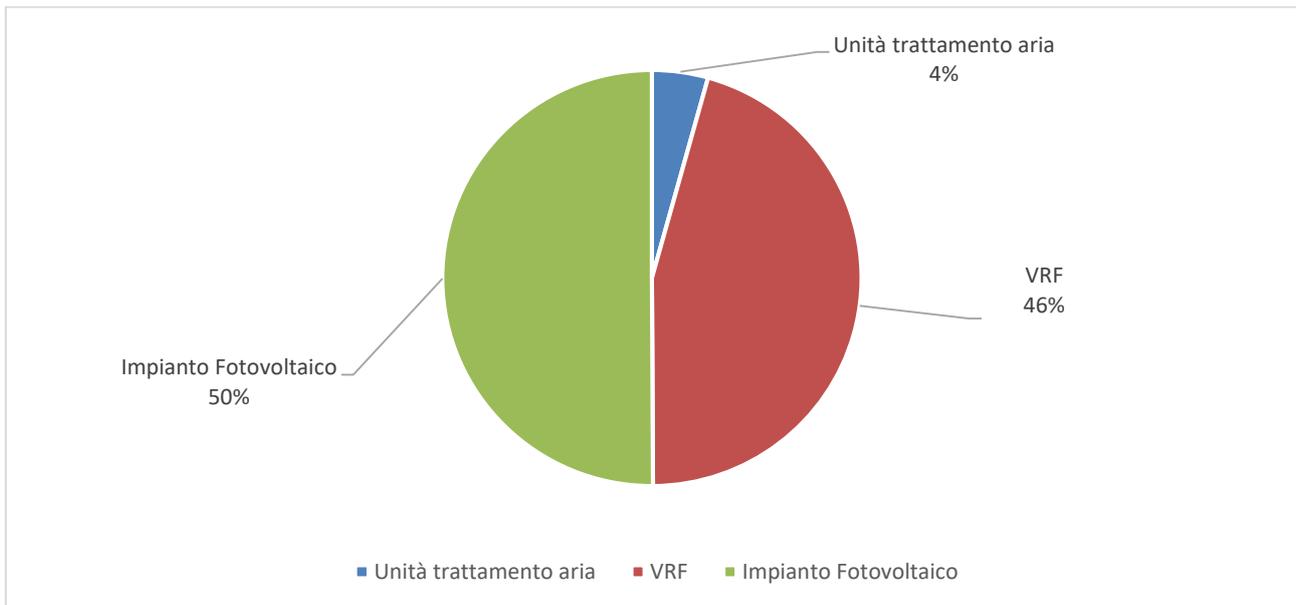


Figura 75 Modulo A: Incidenza dei componenti d’impianto sull’EE – Scenario sAE

In entrambi gli scenari, i componenti d’impianto che contribuiscono in misura maggiore all’impatto sono l’impianto fotovoltaico e il VRF che rappresentano, rispettivamente, il 47% e il 43% dell’EE nello scenario cAE, e il 50% e il 46% nello scenario sAE. L’ unità di trattamento dell’aria incide sull’EE in entrambi gli scenari solo per il 4%.

L’analisi di dominanza riportata di seguito è valida per entrambi gli scenari, perché l’impianto è uguale, con l’unica eccezione che lo scenario cAE include anche il sistema di accumulo elettrico.

Impianto fotovoltaico

Nella figura 76 è illustrata l’analisi dettagliata del contributo all’EE dei componenti che costituiscono l’impianto fotovoltaico

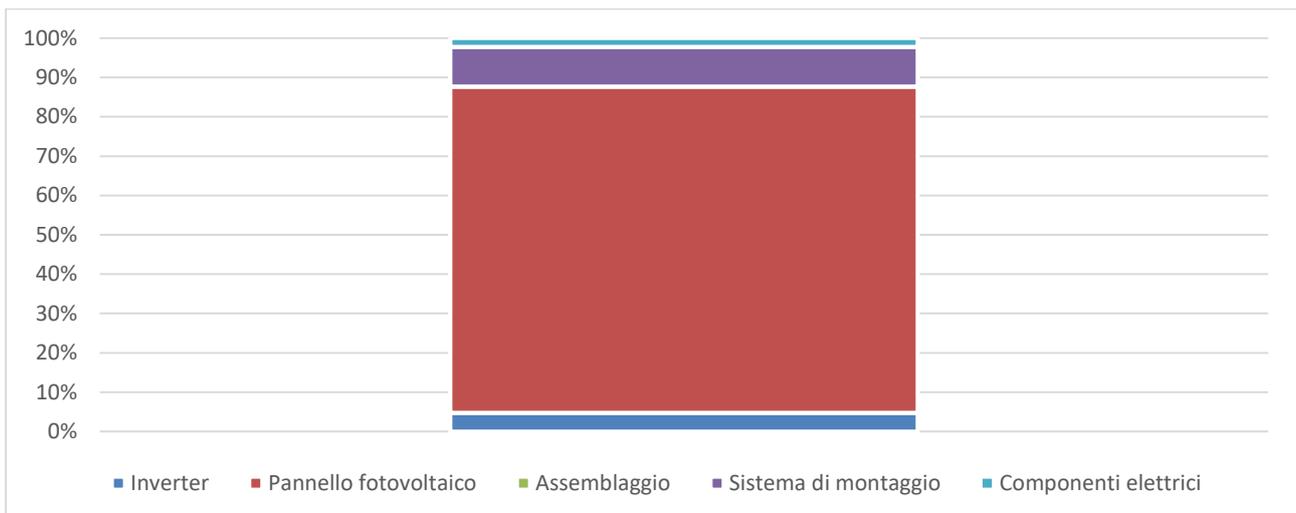


Figura 76 Modulo A: Analisi dell’EE dei componenti che costituiscono l’impianto fotovoltaico

Il contributo più elevato all’EE è associato al processo di produzione dei pannelli fotovoltaici (83%), seguono il sistema di montaggio (10%) e dell’inverter (5%). I componenti elettrici e l’energia elettrica consumata per l’assemblaggio dell’impianto incidono, complessivamente, per circa il 2%.

Nella figura 77 è illustrata l'analisi dettagliata del contributo all'EE del processo produttivo dei pannelli fotovoltaici.

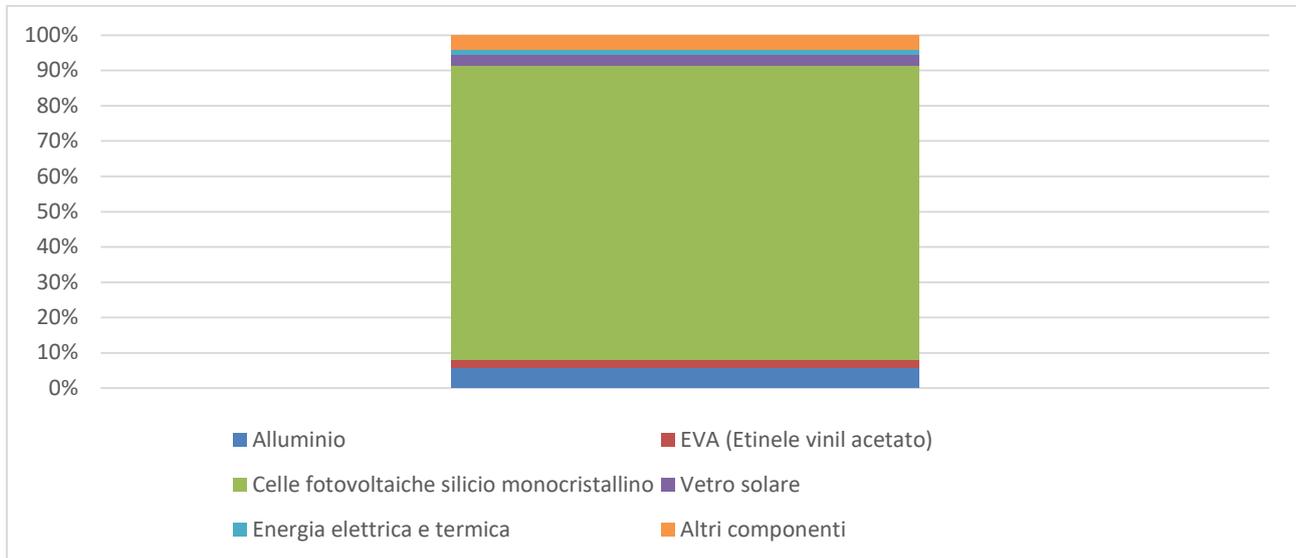


Figura 77 Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono un pannello fotovoltaico

I contributi più elevati all'EE sono associati alle celle fotovoltaiche in silicio monocristallino e all'alluminio che incidono rispettivamente con una percentuale pari all'83% e al 6%. Per "altri componenti" si intendono materiali e processi che singolarmente contribuiscono per meno dell'1% e che complessivamente rappresentano il 4% dell'EE del pannello.

Accumulo elettrico

In figura 78 è illustrato il contributo di ogni componente dell'accumulo elettrico sull'EE.

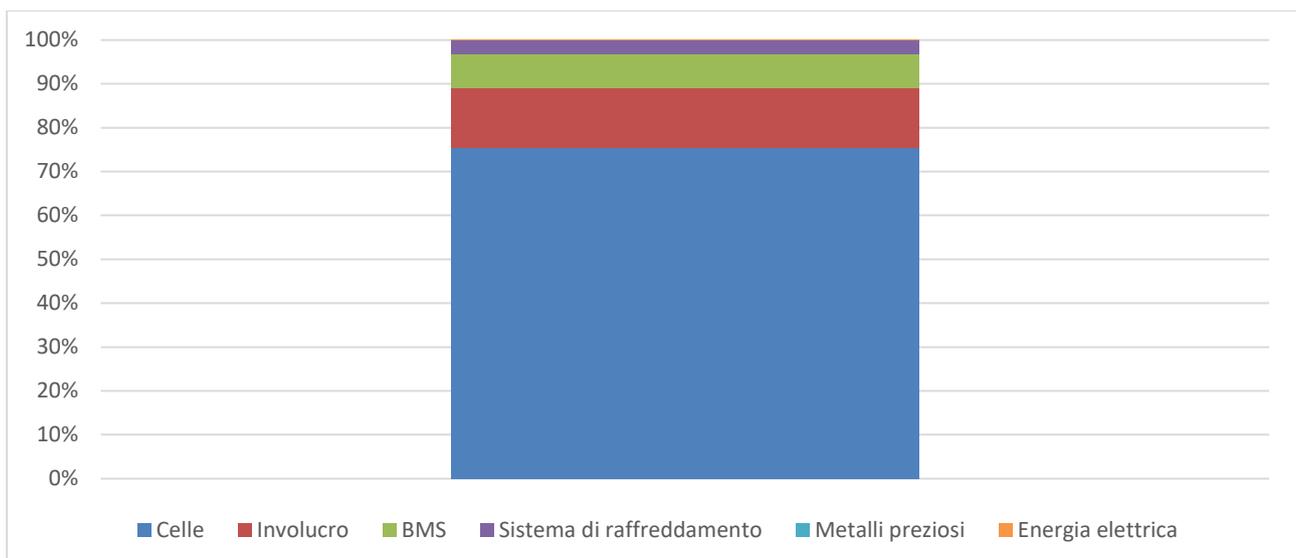


Figura 78 Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono l'accumulo elettrico

I contributi più elevati all'EE sono associati alle celle all'involucro e al BMS, responsabili, rispettivamente, di circa il 75%, il 14% e l'8% dell'EE.

Il sistema di raffreddamento, la produzione di metalli preziosi e l'energia consumata per l'assemblaggio dei componenti della batteria contribuiscono complessivamente al 3% dell'impatto.

VRF

Nella figura 79 è illustrata l'analisi dettagliata del contributo all'EE dei componenti che costituiscono il VRF.

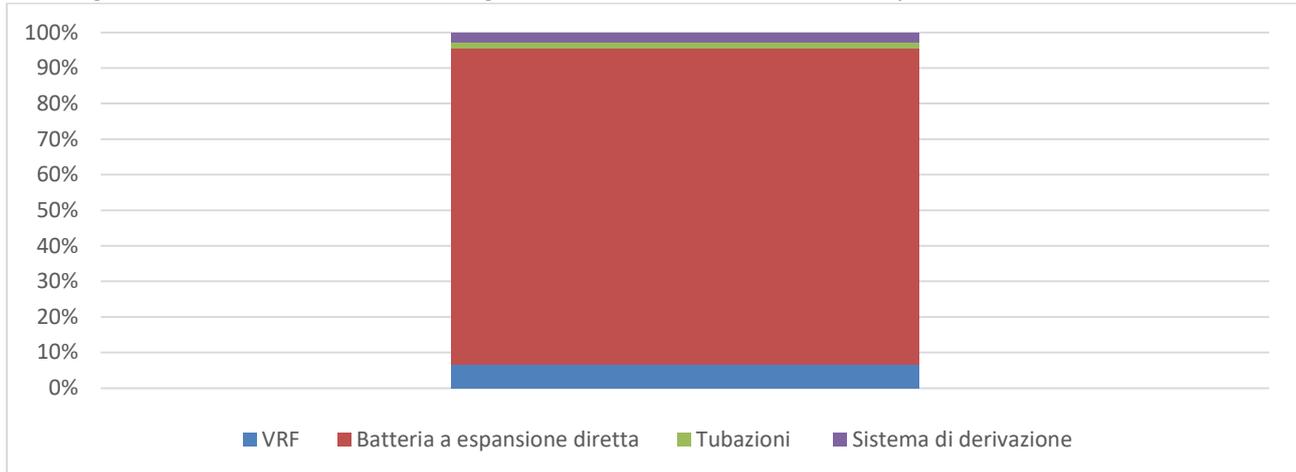


Figura 79 Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono il VRF

I maggiori responsabili dell'energia incorporata sono le batterie ad espansione diretta e il VRF che rispettivamente incidono per l'89% e il 7% dell'EE, seguono con il 3% il sistema di derivazione e le tubazioni con il 2%. In dettaglio, nel processo di produzione delle batterie ad espansione diretta il ventilatore e l'unità di scambio termico rappresentano complessivamente il 92% dell'EE.

Unità di trattamento aria

Nella figura 80 è illustrata l'analisi dettagliata del contributo all'EE dei componenti che costituiscono l'unità di trattamento d'aria.

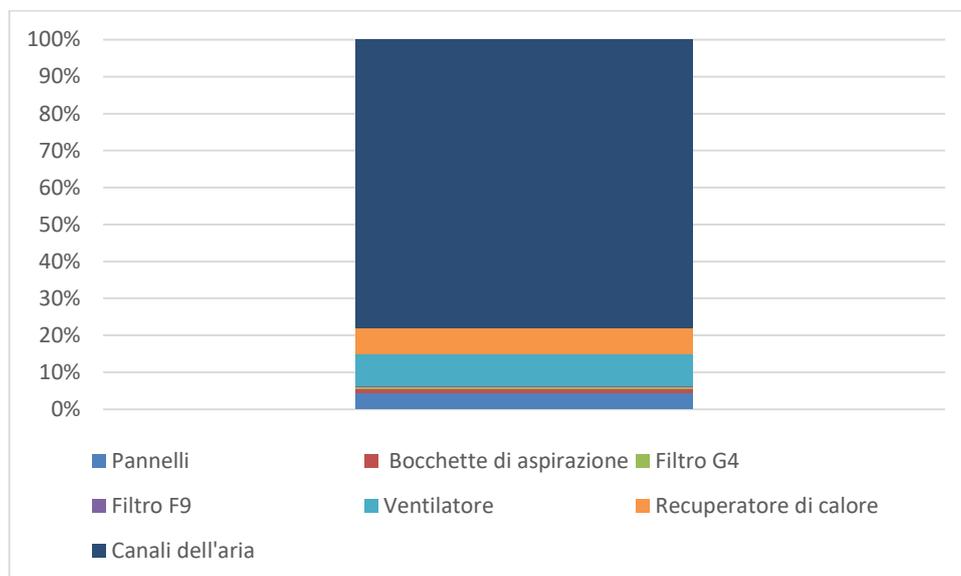


Figura 80 Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono l'Unità di trattamento d'aria

I maggiori responsabili dell'energia incorporata sono i canali dell'aria e il ventilatore che rispettivamente sono responsabili dell'78% e del 9% dell'EE, seguono con il 7% il recuperatore di calore e i pannelli con il 5%. In dettaglio, nel processo di produzione dei canali dell'aria la produzione di alluminio e poliuretano rappresentano complessivamente l'81% dell'EE.

Impatti ambientali – Componenti d'impianto

Nella tabella 35 sono sintetizzati gli impatti ambientali connessi ai componenti di impianto per entrambi gli scenari esaminati e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario cAE rispetto a quelli dello scenario sAE.

Tabella 35 Modulo A: Impatti ambientali dei componenti d'impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
GWP (kg CO _{2eq})	1,15E+05	1,09E+05	6%
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,15E+05	1,08E+05	6%
GWP _b (kg CO _{2eq})	3,64E+02	3,70E+02	-2%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	2,20E+02	2,06E+02	7%

Dall'analisi dei dati emerge che lo scenario sAE presenta prestazioni ambientali migliori ad eccezione della categoria "cambiamento climatico –biogenico.

Nelle tabelle 36 e 37 è riportato il contributo agli impatti di ogni componente d'impianto, rispettivamente negli scenari cAE e sAE.

Tabella 36 Modulo A: Contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali – Scenario cAE

Categoria	Unità di trattamento aria	VRF	Impianto fotovoltaico	Accumulo elettrico
GWP (kg CO _{2eq})	4,16E+03	5,86E+04	4,61E+04	6,39E+03
GWP _f (kg CO _{2eq})	4,06E+03	5,87E+04	4,55E+04	6,38E+03
GWP _b (kg CO _{2eq})	5,91E+01	-1,89E+02	4,99E+02	-5,75E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,63E+01	8,07E+01	8,87E+01	1,49E+01

Tabella 37 Modulo A: Contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali – Scenario sAE

Categoria	Unità di trattamento aria	VRF	Impianto fotovoltaico
GWP (kg CO _{2eq})	4,16E+03	5,86E+04	4,61E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	4,06E+03	5,87E+04	4,55E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	5,91E+01	-1,89E+02	4,99E+02
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,63E+01	8,07E+01	8,87E+01

Inoltre, per un'analisi più immediata, il contributo agli impatti di ogni componente d'impianto è illustrato nei grafici riportati nelle figure 81-82 e nelle figure 83-84, rispettivamente, per gli scenari cAE e sAE.

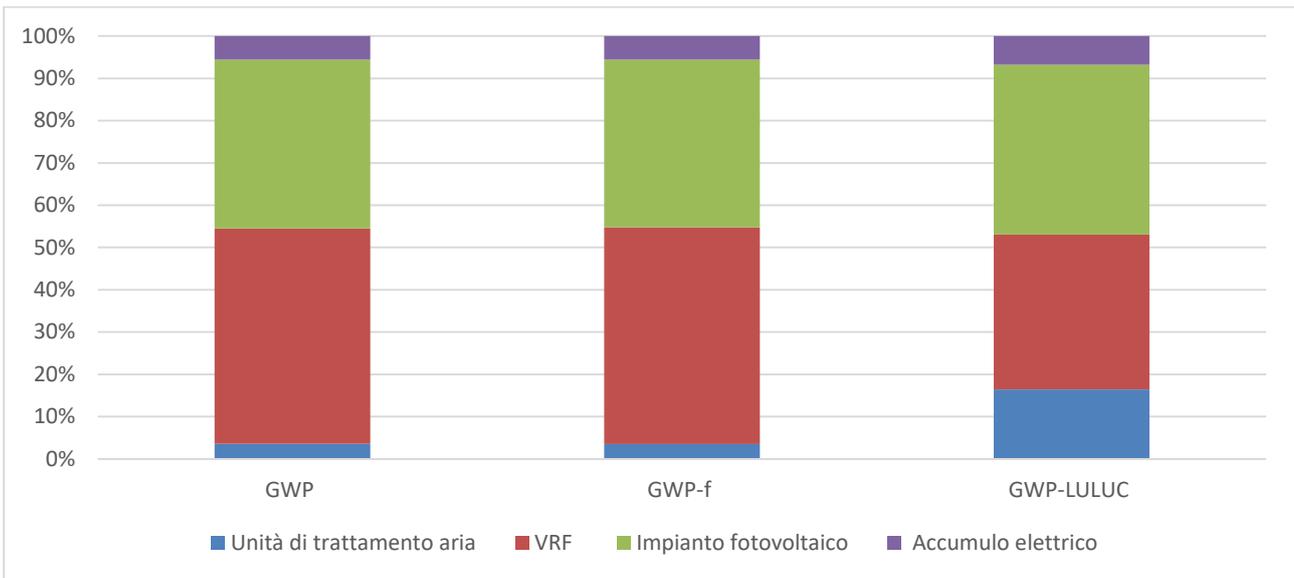


Figura 81 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario cAE

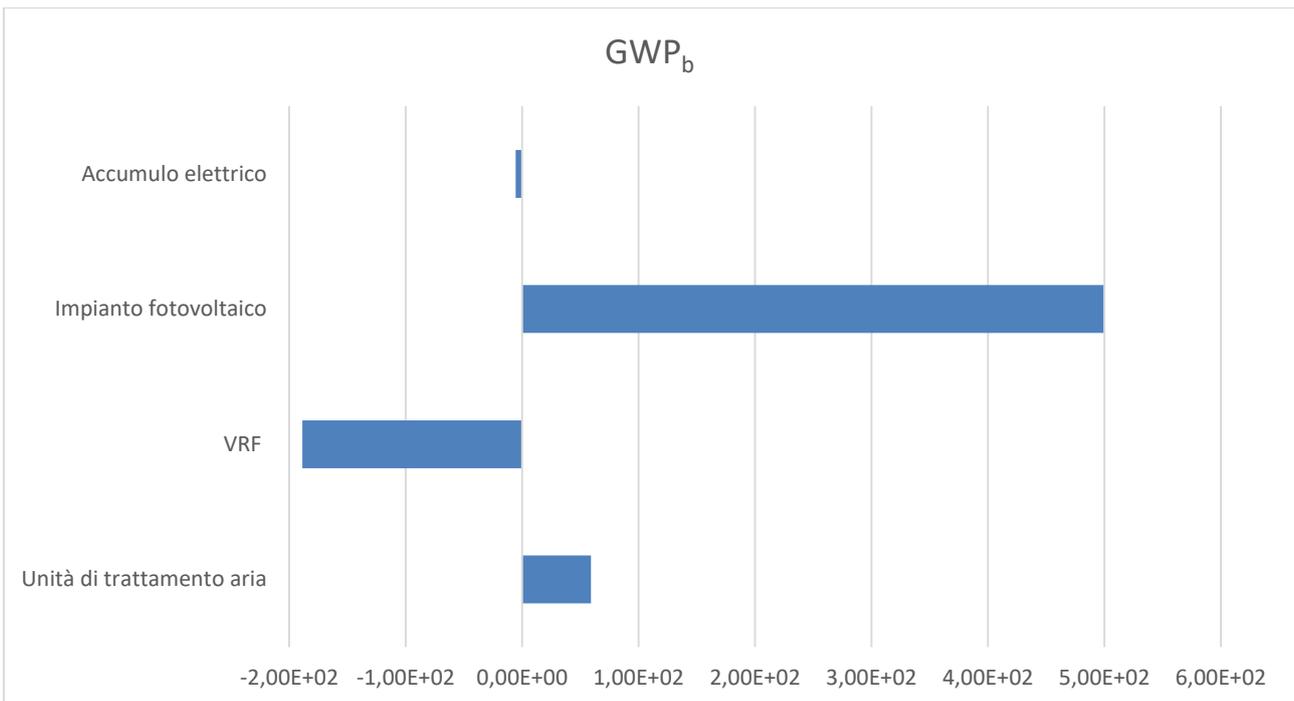


Figura 82 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali GWP_b – Scenario cAE

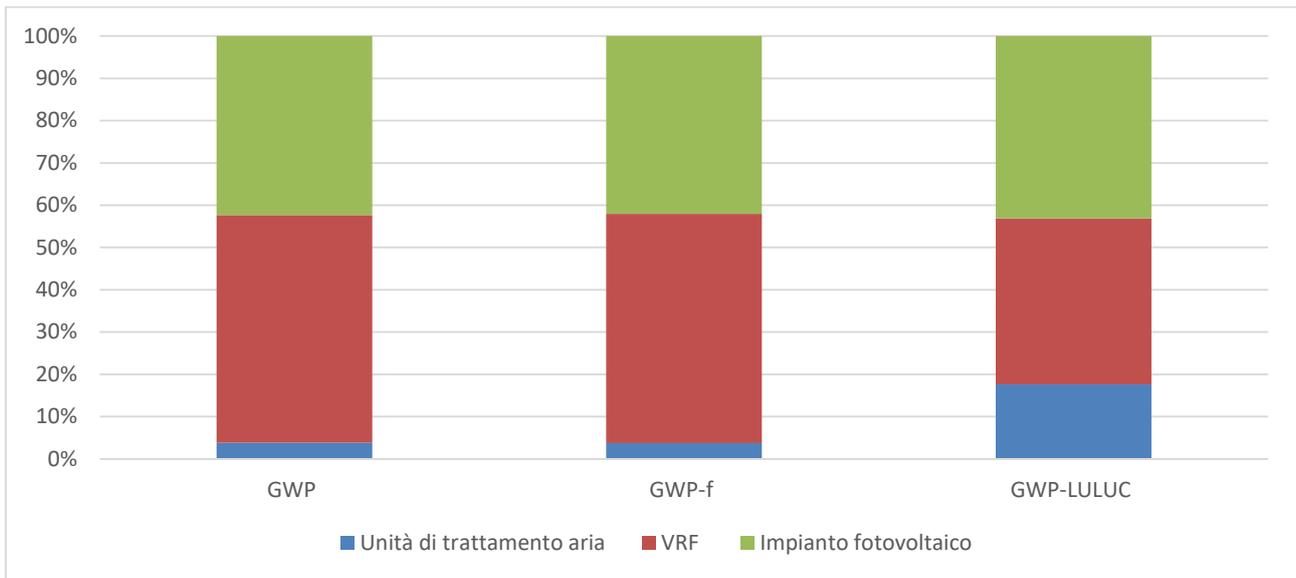


Figura 83 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario SAE

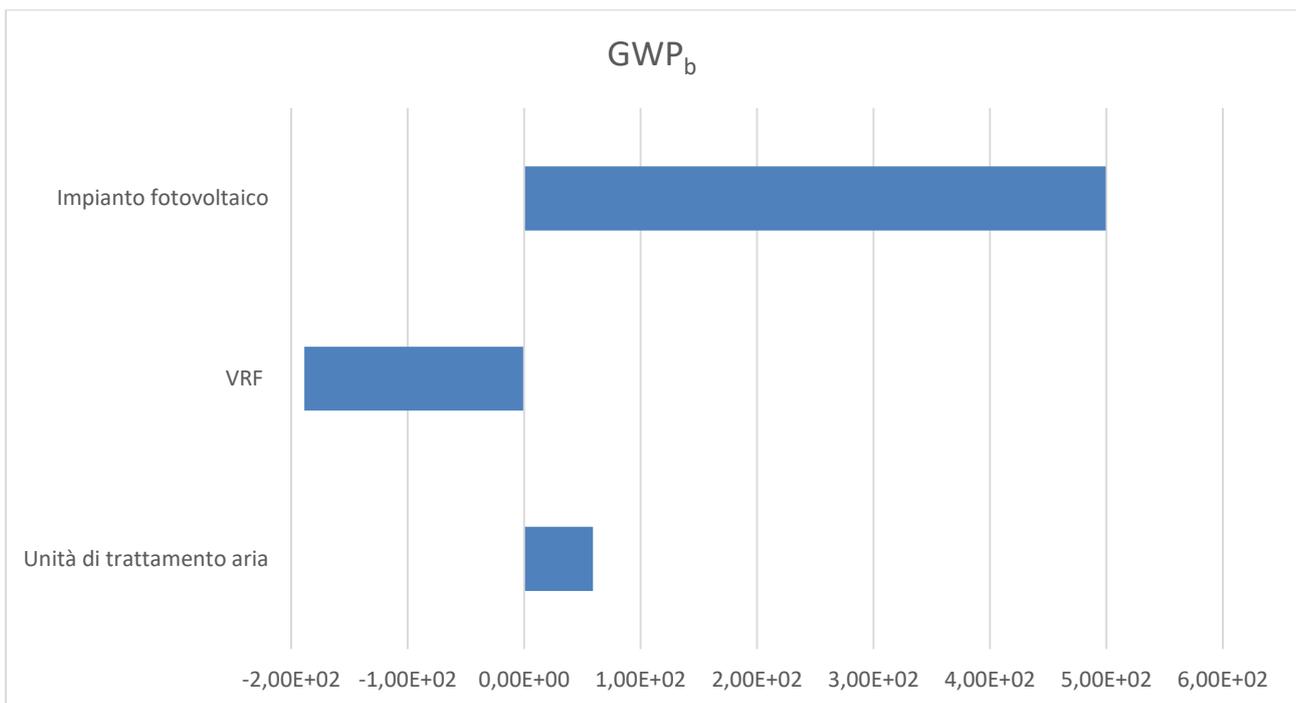


Figura 84 Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali GWP_b – Scenario SAE

In entrambi gli scenari considerati il VRF e l'impianto fotovoltaico sono i componenti responsabili del maggior contributo agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} mentre nel GWP_b solo il VRF ha un impatto negativo.

Di seguito è descritta l'analisi dettagliata dei componenti d'impianto che ha consentito di identificare i materiali responsabili del maggior contributo agli impatti ambientali. La trattazione che segue è descrittiva di entrambi gli scenari di impianto esaminati.

VRF

Nella figura 85 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati al GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti del VRF.

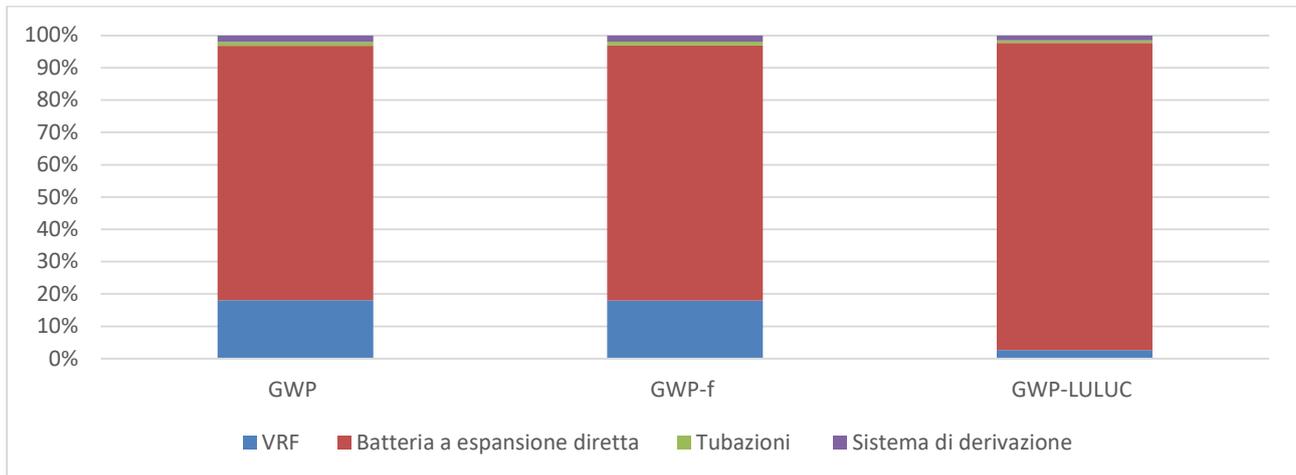


Figura 85 Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario cAE-sAE

La batteria ad espansione diretta è il maggior responsabile del contributo agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} e ciò è dovuto al processo di produzione nelle batterie ad espansione diretta del ventilatore e dell'unità di scambio termico.

Nella figura 86 è illustrata il contributo dei componenti d'involucro all' impatto ambientale GWP_b, dei componenti del VRF.

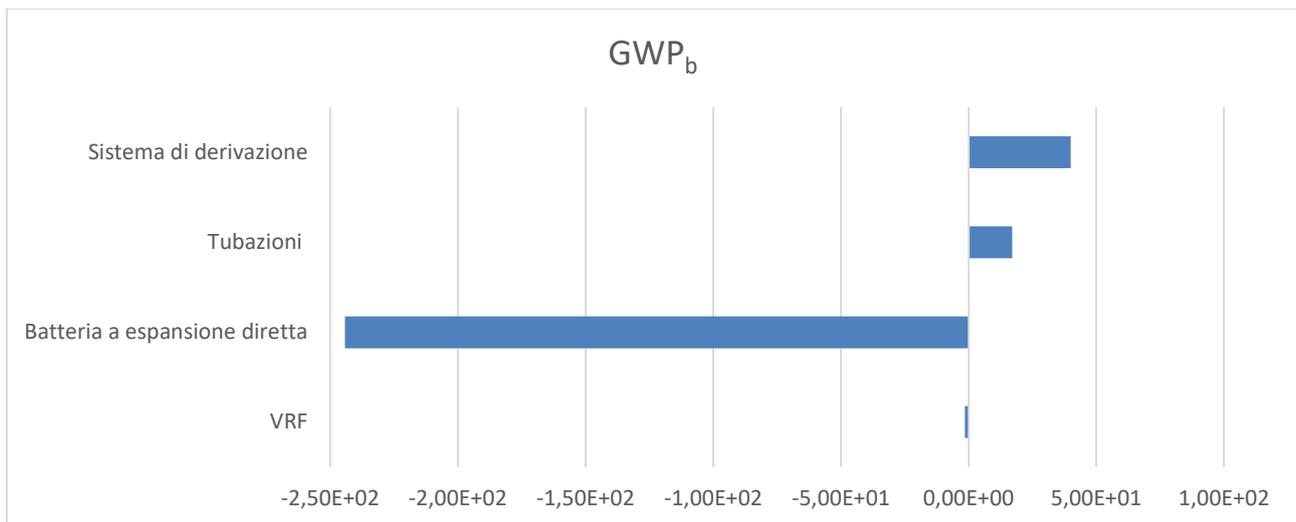


Figura 86 Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali GWP_b – Scenario cAE-sAE

La batteria ad espansione diretta fornisce un contributo negativo alla categoria d'impatto ambientale GWP_b; ciò è dovuto al legno utilizzato nelle infrastrutture della catena di approvvigionamento.

Impianto fotovoltaico

Nella figura 87 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati al GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti dell'impianto fotovoltaico.

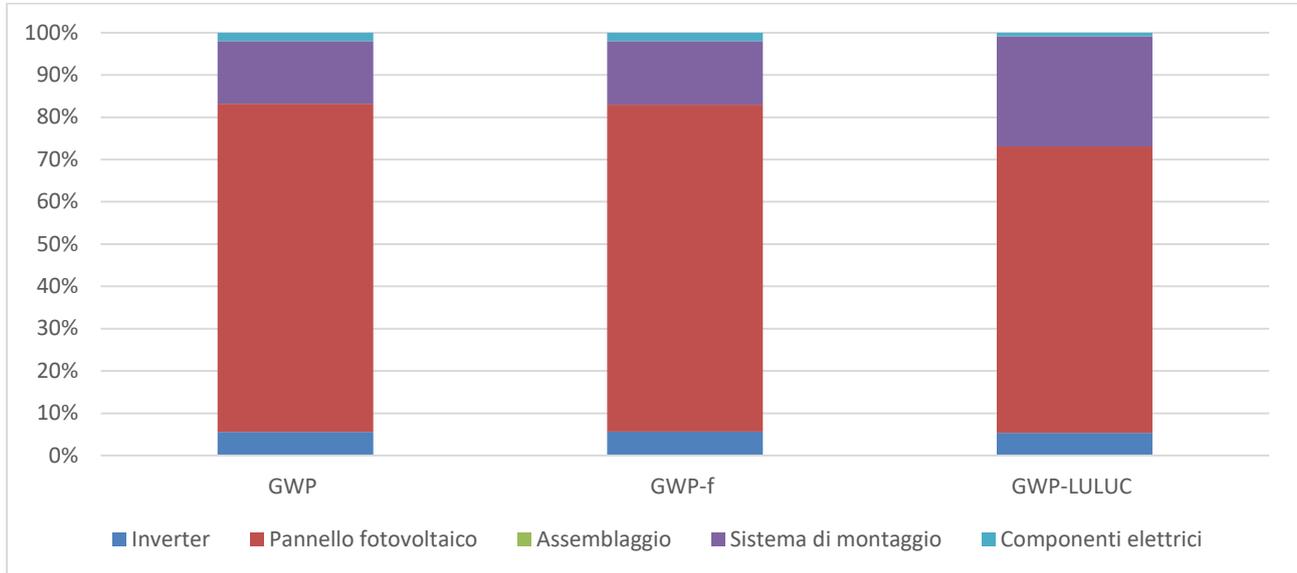


Figura 87 Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti del pannello fotovoltaico

Nella figura 88 è illustrato il contributo dei componenti dell'impianto fotovoltaico all'impatto ambientale GWP_b.

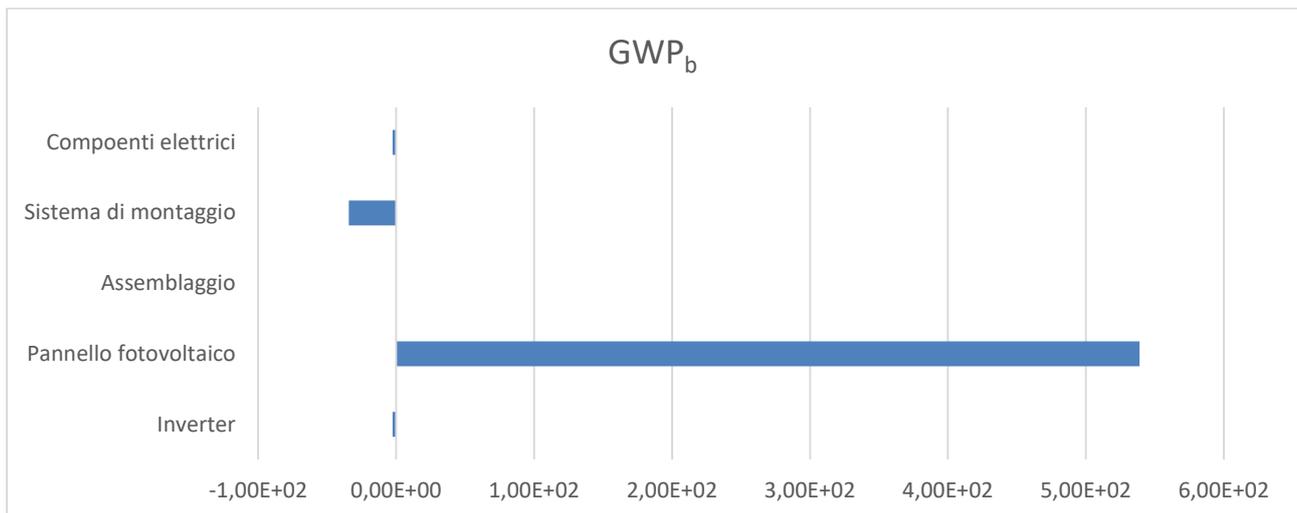


Figura 88 Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali GWP_b dei componenti del pannello fotovoltaico

La produzione del pannello fotovoltaico è il maggior responsabile di tutti gli impatti ambientali analizzati e ciò è dovuto in particolare al processo di produzione delle celle fotovoltaiche in silicio monocristallino.

Accumulo elettrico

Nella figura 89 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati ai componenti dell'accumulo elettrico.

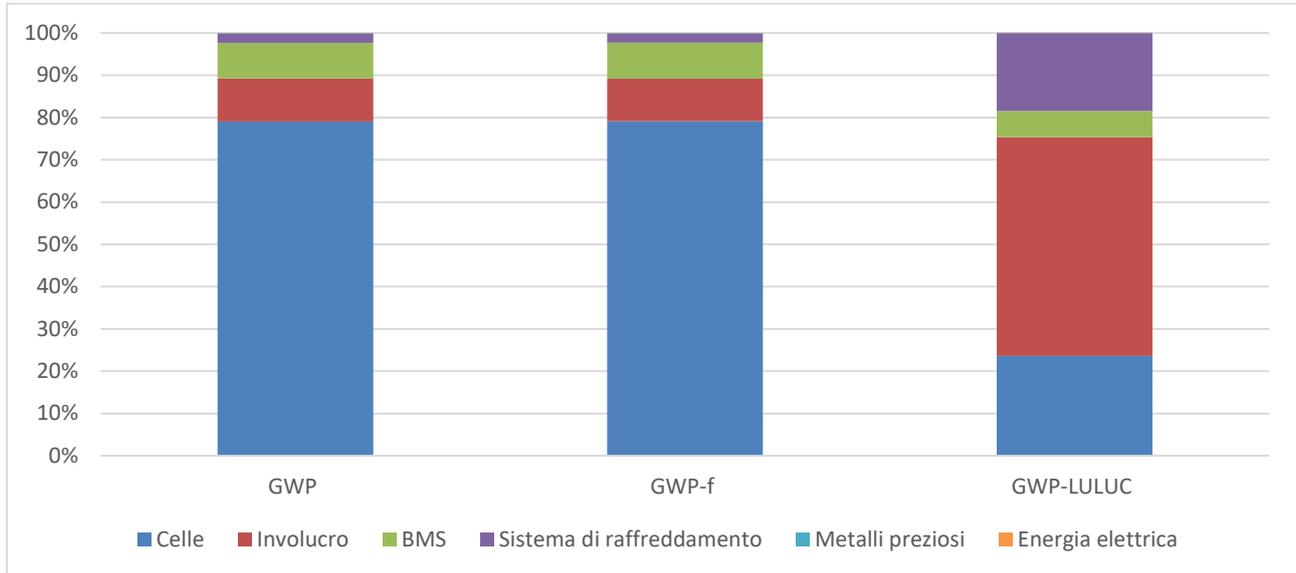


Figura 89 Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti dell'accumulo elettrico

Le celle sono responsabili del maggiore contributo agli impatti in quasi tutte le categorie investigate mentre l'involucro della batteria incide per lo più sul GWP_{LULUC} a causa della presenza di alluminio.

Nella figura 90 è illustrato il contributo dei componenti dell'accumulo elettrico all' impatto ambientale GWP_b.

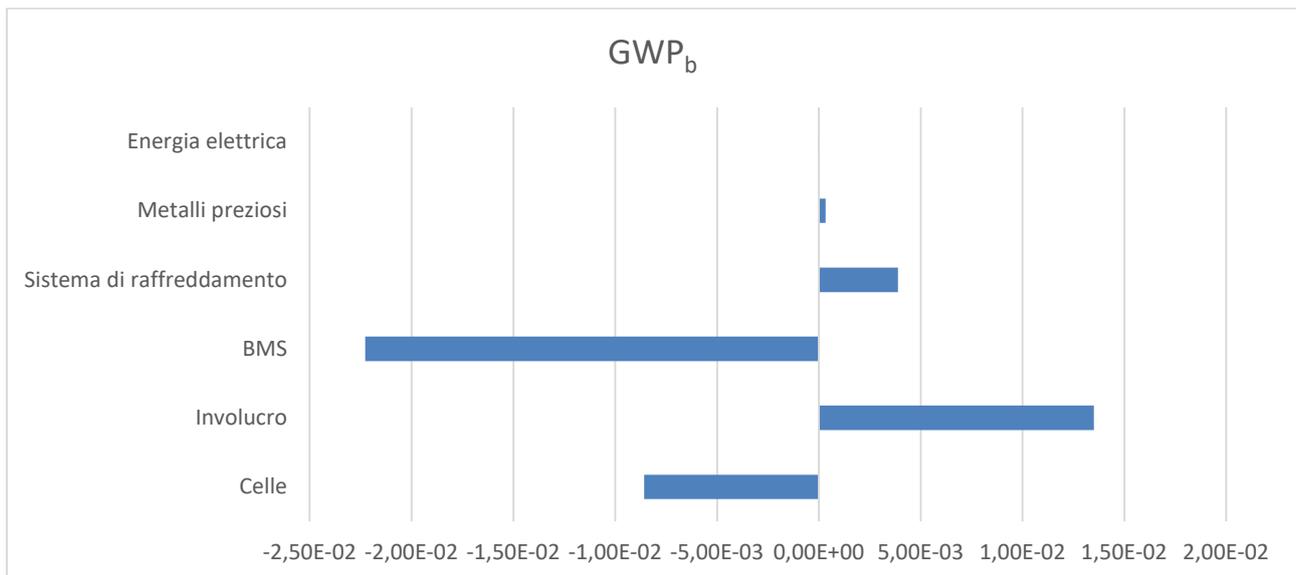


Figura 90 Modulo A Analisi di contributo all' impatto ambientale GWP_b dei componenti dell'accumulo elettrico

il BMS e le celle hanno un impatto negativo a causa è imputabile al legno utilizzato nelle infrastrutture della catena di approvvigionamento di questi componenti.

Unità di trattamento aria

Nelle figure 91 e 92 è illustrata, rispettivamente, la distribuzione percentuale degli impatti associati ai componenti dell'unità di trattamento aria e il contributo dei componenti sull'impatto ambientale GWP_b.

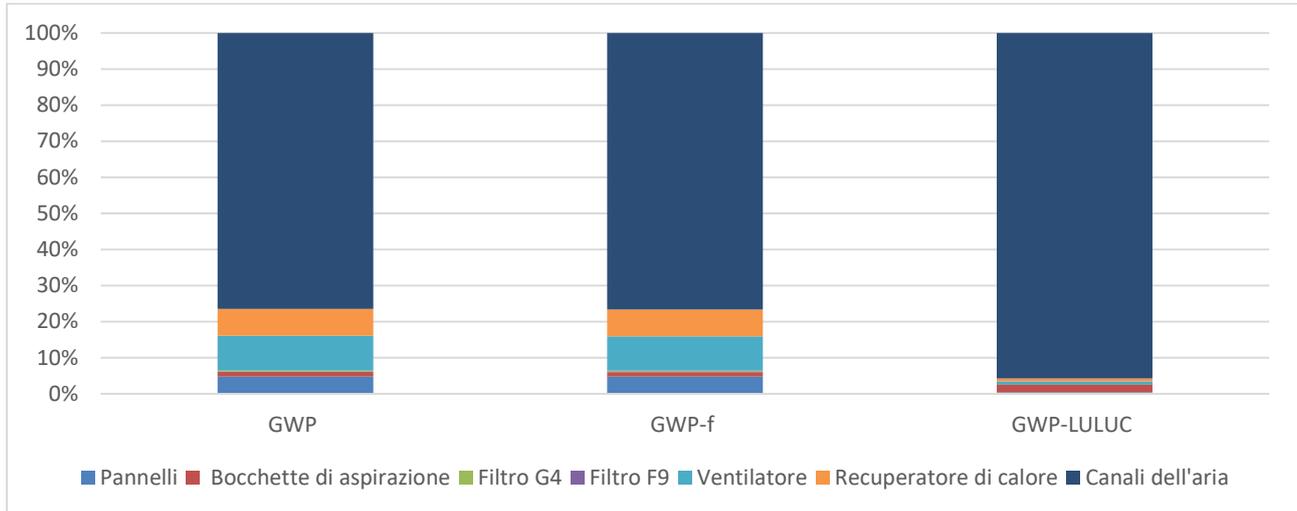


Figura 91 Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} dei componenti dell'Unità di trattamento aria

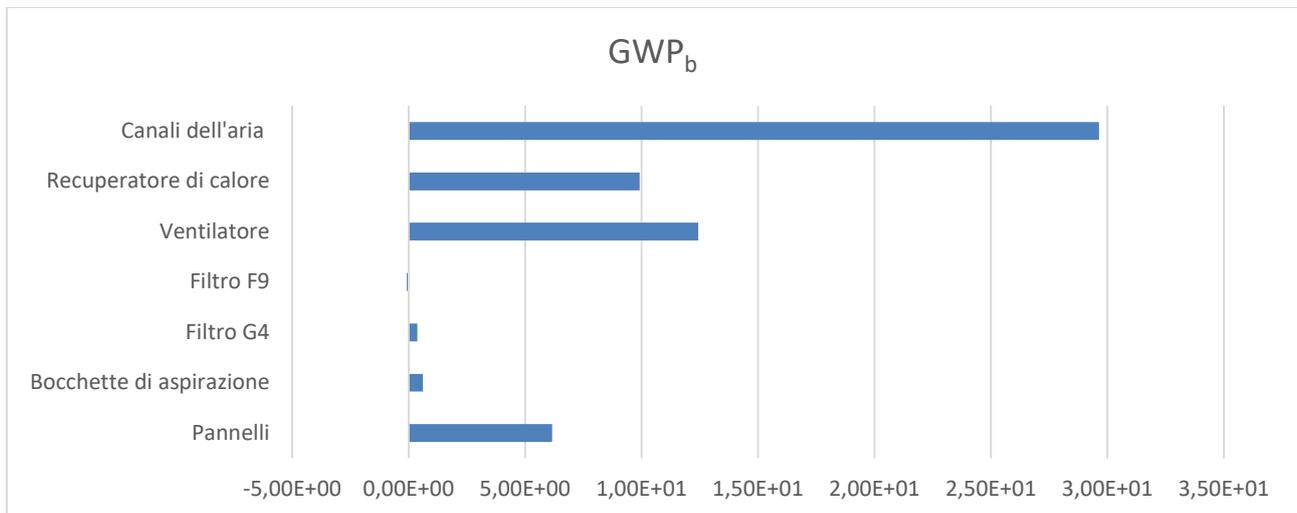


Figura 92 Modulo A Analisi di contributo all' impatto ambientale GWP_b dei componenti dell'Unità di trattamento aria

I maggiori responsabili degli impatti associati alle categorie GWP, GWP_f, GWP_b e GWP_{LULUC} sono i canali dell'aria e il ventilatore. In dettaglio, nel processo di produzione dei canali dell'aria la produzione di alluminio rappresenta il maggiore responsabile della categoria GWP_{LULUC}.

6.2 Impatti energetico – ambientali – Modulo B

Modulo B4 – Sostituzione dei componenti di involucro

Nella tabella 38 sono sintetizzati i valori di energia incorporata connessi agli interventi di sostituzione pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio. Gli interventi includono le fasi di produzione dei nuovi componenti e di trattamento di fine vita degli elementi sostituiti. La modellizzazione dei nuovi componenti è stata effettuata in accordo all'inventario degli elementi di involucro (tabella 23) di entrambi gli scenari investigati.

Tabella 38 Modulo B4: Energia incorporata nei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria d'impatto	Scenario XPS	Scenario FC
EE(MJ)	1,50E+06	6,78E+05
EE _{nr} (MJ)	1,38E+06	5,38E+05
EE _r (MJ)	1,22E+05	1,40E+05

Nello scenario XPS il consumo di energia primaria è pari a 1,50E+06 MJ, di cui il 92% costituito da energia primaria non rinnovabile. Nello scenario FC l'energia incorporata è pari a 6,78E+05 MJ, di cui il 79% costituito da energia primaria non rinnovabile. L'impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa consente di ridurre l'EE relativa al modulo B4 nello scenario FC del 55% rispetto allo scenario XPS.

In dettaglio nelle figure 93 e 94 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti d'involucro sostituiti sull'EE negli scenari XPS e FC.

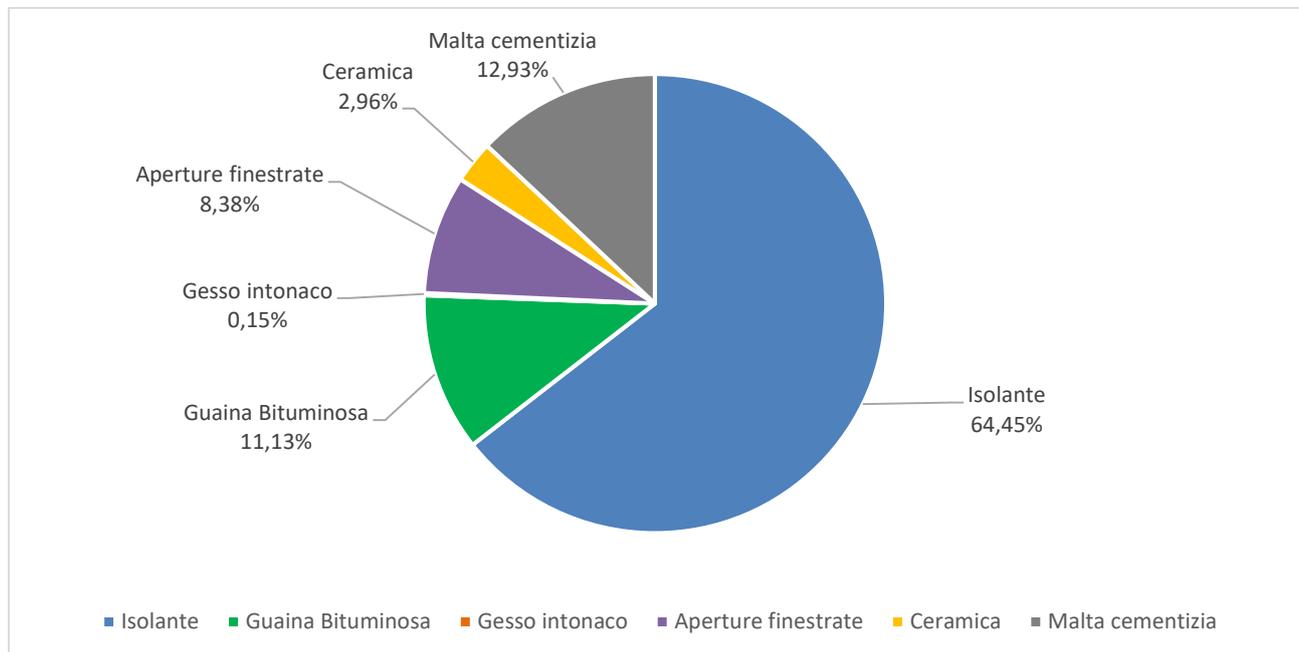


Figura 93 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sull'EE – Scenario XPS

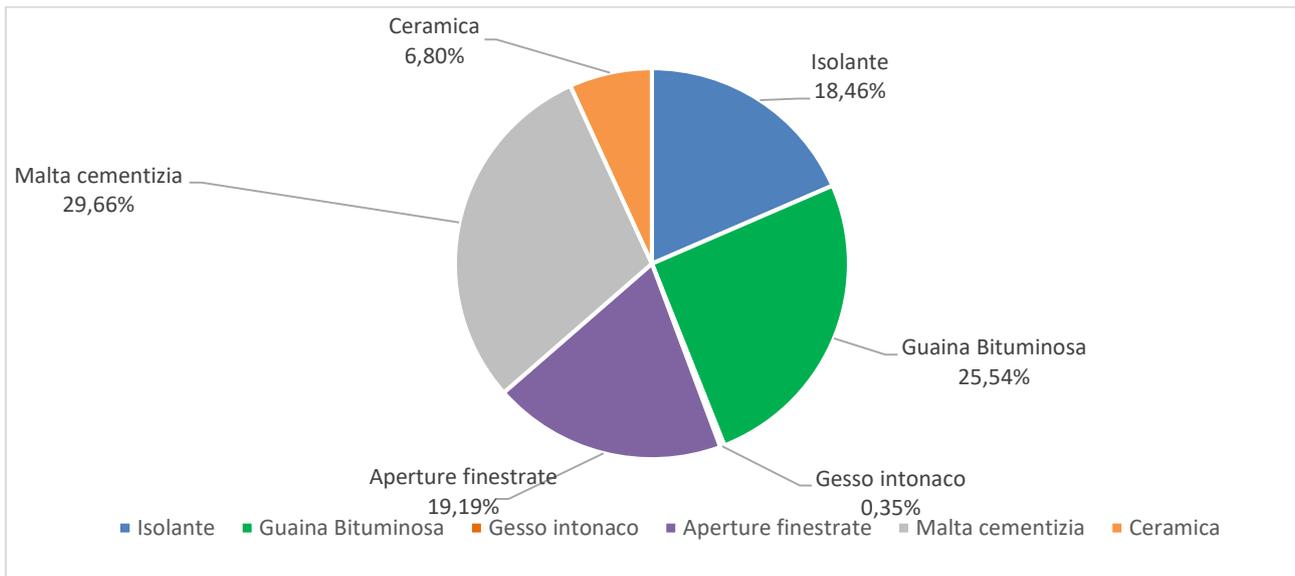


Figura 94 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sull'EE – Scenario FC

L'intervento di sostituzione del materiale isolante contribuisce negli scenari XPS e FC, rispettivamente, a circa il 65% e al 18% del consumo di energia primaria complessivo degli interventi di sostituzione degli elementi di involucro. La sostituzione della malta cementizia incide sull'EE per lo scenario XPS e FC rispettivamente circa il 13% e 30%. La sostituzione di questi due materiali nei due scenari comporta il consumo di EE rispettivamente di circa il 78% e del 48%. La guaina bituminosa è responsabile di circa l'11% dell'EE nello scenario XPS e del 26% nello scenario FC mentre le aperture finestrate sono responsabili di circa l'8% dell'EE nello scenario XPS e del 19% nello scenario FC. La sostituzione del gesso intonaco presenta contributi trascurabili in entrambi gli scenari esaminati.

Nella tabella 39 sono rappresentati gli impatti ambientali connessi agli interventi di sostituzione degli elementi di involucro per entrambi gli scenari esaminati.

Tabella 39 Modulo B4: Impatti ambientali componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria d'impatto	Unità di riferimento	Scenario XPS	Scenario FC
Climate change	GWP kg CO ₂ eq	1,04E+05	3,93E+04
Climate change – Fossil	GWP _f kg CO ₂ eq	1,06E+05	4,24E+04
Climate change – Biogenic	GWP _b kg CO ₂ eq	-1,56E+03	-3,16E+03
Climate change – Land use and LU change	GWP _{LULUC} kg CO ₂ eq	1,06E+02	1,10E+02

Lo scenario FC presenta prestazioni ambientali migliori in tutte le categorie d'impatto esaminate tranne nel GWP_{LULUC}, per tale indicatore si rileva una differenza del 3%.

Lo scenario FC presenta prestazioni ambientali migliori di circa il 60% sulla categoria "cambiamento climatico" e "cambiamento climatico fossile" e di circa 100% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico".

Nelle tabelle 40 e 41 è riportato il contributo agli impatti della fase di sostituzione degli elementi di involucro, rispettivamente negli scenari XPS e FC.

Tabella 40 Modulo B4: Impatti ambientali componenti di involucro – Scenario XPS

Categoria	Isolante	Guaina Bituminosa	Gesso intonaco	Aperture finestrate	Ceramica	Malta cementizia
GWP kg CO ₂ eq	4,06E+04	2,33E+03	1,41E+02	1,96E+03	2,21E+03	2,66E+04
GWP _f kg CO ₂ eq	4,02E+04	2,31E+03	1,41E+02	5,42E+03	2,22E+03	2,51E+04
GWP _b kg CO ₂ eq	4,56E+02	1,25E+01	2,30E-01	-3,54E+03	-9,74E+00	1,51E+03
GWP _{LULUC} kg CO ₂ eq	7,65E+00	2,41E+00	5,26E-02	8,79E+01	1,71E+00	6,20E+00

Tabella 41 Modulo B4: Impatti ambientali componenti di involucro – Scenario FC

Categoria	Isolante	Guaina Bituminosa	Gesso intonaco	Aperture finestrate	Malta cementizia	Ceramica
GWP kg CO ₂ eq	4,15E+03	2,33E+03	1,42E+02	1,96E+03	2,66E+04	2,21E+03
GWP _f kg CO ₂ eq	5,29E+03	2,32E+03	1,42E+02	5,42E+03	2,51E+04	2,22E+03
GWP _b kg CO ₂ eq	-1,15E+03	1,25E+01	2,31E-01	-3,54E+03	1,51E+03	-9,75E+00
GWP _{LULUC} kg CO ₂ eq	1,13E+01	2,41E+00	5,28E-02	8,79E+01	6,21E+00	1,71E+00

L'impatto negativo della ceramica sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" è connesso al consumo dell'argilla.

Il contributo agli impatti di ogni componente dell'involucro sostituito è illustrato nelle figure 95-96 e nelle figure 97-98 rispettivamente per gli scenari XPS e FC.

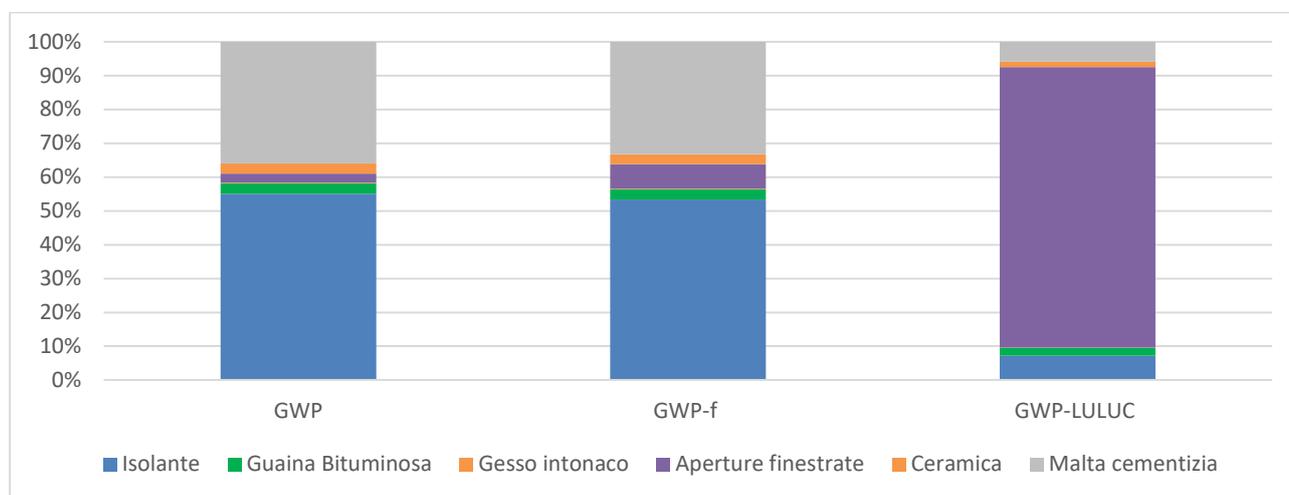


Figura 95 Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario XPS

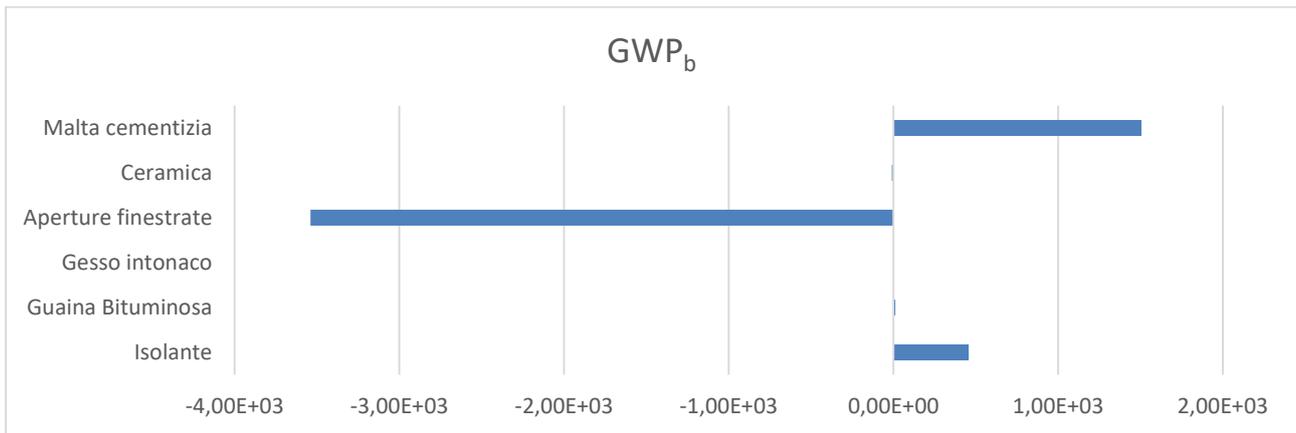


Figura 96 Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sul GWP_b – Scenario XPS

Nello scenario XPS, la sostituzione del materiale isolante contribuisce agli impatti ambientali con percentuali variabili dal 50% sulla categoria (GWP) a circa il 10% sulla categoria GWP_{LULUC}. La sostituzione delle aperture finestrate incide per circa l'80% sul GWP_{LULUC} e fornisce il maggior contributo negativo al GWP_b. I suddetti impatti sono principalmente connessi alla filiera di approvvigionamento del legno impiegato per la produzione del telaio.

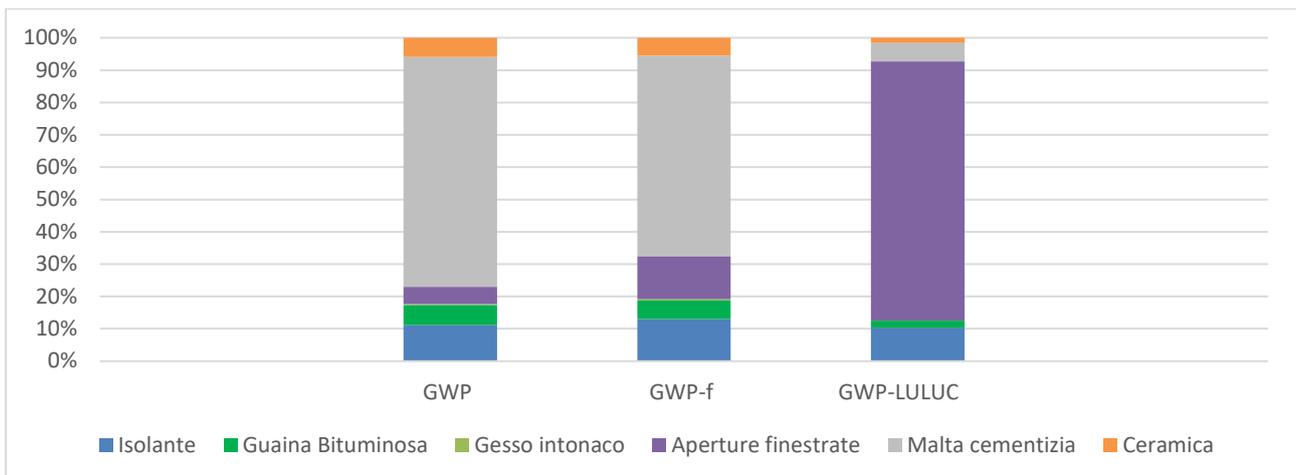


Figura 97 Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} – Scenario FC

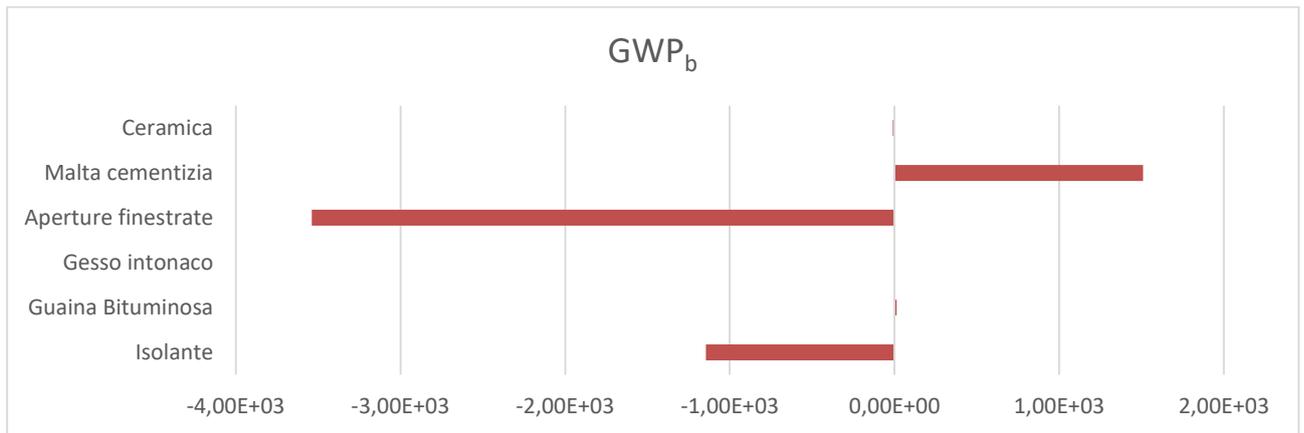


Figura 98 Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali GWP_b – Scenario FC

Nello scenario FC la sostituzione del materiale isolante contribuisce in minima parte agli impatti ambientali valutati (circa il 10 % nel GWP, GWP_f e GWP_{LULUC}) e determina un impatto negativo nella categoria d’impatto GWP_b.

La sostituzione della malta cementizia incide per circa il 70% sul GWP e per circa il 60% sul GWP_f, contribuisce in minima parte al GWP_{LULUC} e causa il maggior contributo positivo al GWP_b.

La sostituzione delle aperture finestrate incide per circa l’80% sul GWP_{LULUC} e fornisce il maggior contributo negativo al GWP_b.

Nelle tabelle 42 e 43 è riportato il contributo agli impatti energetico – ambientali ripartito per fase di produzione e trattamento di fine vita di ogni componente sostituito, rispettivamente per gli scenari XPS e FC.

Tabella 42 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario XPS

Categoria di impatto	Isolante XPS		Guaina bituminosa		Gesso intonaco		Aperture finestrate		Ceramica + Malta cementizia	
	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita
GWP	4,06E+04	2,85E+04	2,33E+03	5,91E+02	1,41E+02	4,59E+02	1,96E+03	2,11E+02	2,88E+04	5,73E+02
GWP _f	4,02E+04	2,85E+04	2,31E+03	5,91E+02	1,41E+02	4,57E+02	5,42E+03	2,02E+02	2,73E+04	5,71E+02
GWP _b	4,56E+02	1,27E+00	1,25E+01	3,74E-01	2,30E-01	1,48E+00	-3,54E+03	9,50E+00	1,50E+03	1,84E+00
GWP _{LULUC}	7,65E+00	3,35E-02	2,41E+00	2,15E-02	5,26E-02	8,97E-02	8,79E+01	1,53E-02	7,91E+00	1,12E-01

Tabella 43 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario FC

Categoria di impatto	Isolante FC		Guaina bituminosa		Gesso intonaco		Aperture finestrate		Ceramica + Malta cementizia	
	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita
GWP	4,15E+03	5,59E+01	2,33E+03	5,92E+02	1,42E+02	4,60E+02	1,96E+03	2,11E+02	2,88E+04	5,74E+02
GWP _f	5,29E+03	5,57E+01	2,32E+03	5,92E+02	1,42E+02	4,59E+02	5,42E+03	2,02E+02	2,73E+04	5,72E+02
GWP _b	-1,15E+03	1,80E-01	1,25E+01	3,75E-01	2,31E-01	1,48E+00	-3,54E+03	9,50E+00	1,50E+03	1,85E+00
GWP _{LULUC}	1,13E+01	1,09E-02	2,41E+00	2,16E-02	5,28E-02	9,00E-02	8,79E+01	1,53E-02	7,92E+00	1,12E-01

I trattamenti di fine vita di tutti i componenti hanno impatti ambientali inferiori rispetto ai processi di produzione in entrambi gli scenari esaminati, tranne nel caso del gesso intonaco.

Inoltre, l'impatto del fine vita dell'isolante in fibra cellulosa è inferiore all'impatto del fine vita dell'isolante in XPS, nonostante il peso sia superiore (tabella 23).

Per la trattazione dettagliata dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro si rimanda al Modulo C.

Modulo B4 – Sostituzione dei componenti d'impianto

Nelle tabelle 44 e 45 sono riepilogati i valori di energia incorporata e di impatto ambientale connessi agli interventi di sostituzione pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio per il sistema impiantistico. Gli interventi includono le fasi di produzione dei nuovi componenti e i trattamenti di fine vita degli elementi sostituiti modellizzati in accordo all'inventario descritto degli elementi d'impianto (tabella 24) di entrambi gli scenari investigati. Gli interventi di sostituzione pianificati per i due scenari (cAE e sAE) differiscono soltanto per l'accumulo elettrico non previsto nello scenario sAE. Pertanto, la variazione degli impatti energetico – ambientali nei due scenari esaminati è dovuta unicamente alla diversa configurazione impiantistica.

Tabella 44 Modulo B4: Energia incorporata componenti d'impianto– Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria d'impatto	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
EE(MJ)	3,55E+06	3,34E+06	6%
EE _{nr} (MJ)	3,15E+06	2,97E+06	6%
EE _r (MJ)	3,93E+05	3,74E+05	5%

Tabella 45 Modulo B4: Impatti ambientali componenti d'impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria d'impatto	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE- Scenario sAE) /Scenario sAE
GWP kg CO ₂ eq	2,72E+05	2,60E+05	5%
GWP _f kg CO ₂ eq	2,72E+05	2,59E+05	5%
GWP _b kg CO ₂ eq	1,43E+02	1,54E+02	-7%
GWP _{LULUC} kg CO ₂ eq	4,71E+02	4,41E+02	7%

Dall'analisi è emerso che l'impiego dell'accumulo elettrico (scenario cAE) causa un incremento dell'EE e degli impatti sul GWP e GWP_f rispettivamente del 6% e del 5% rispetto allo scenario sAE. Il GWP_{LULUC} invece presenta un incremento del 7% mentre il GWP_b ha un decremento rispetto allo scenario sAE del 7%.

Nelle figure 99 e 100 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti dell'impianto sostituiti sull'EE negli scenari cAE e sAE.

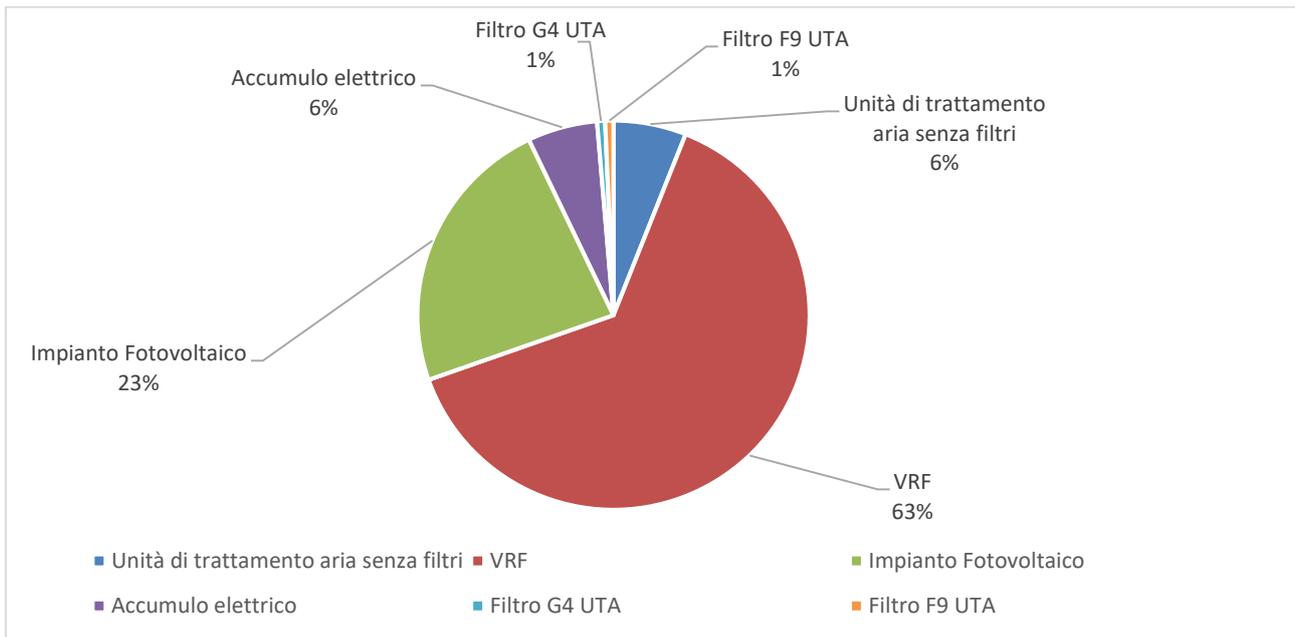


Figura 99 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d’impianto sostituiti sull’EE – Scenario cAE

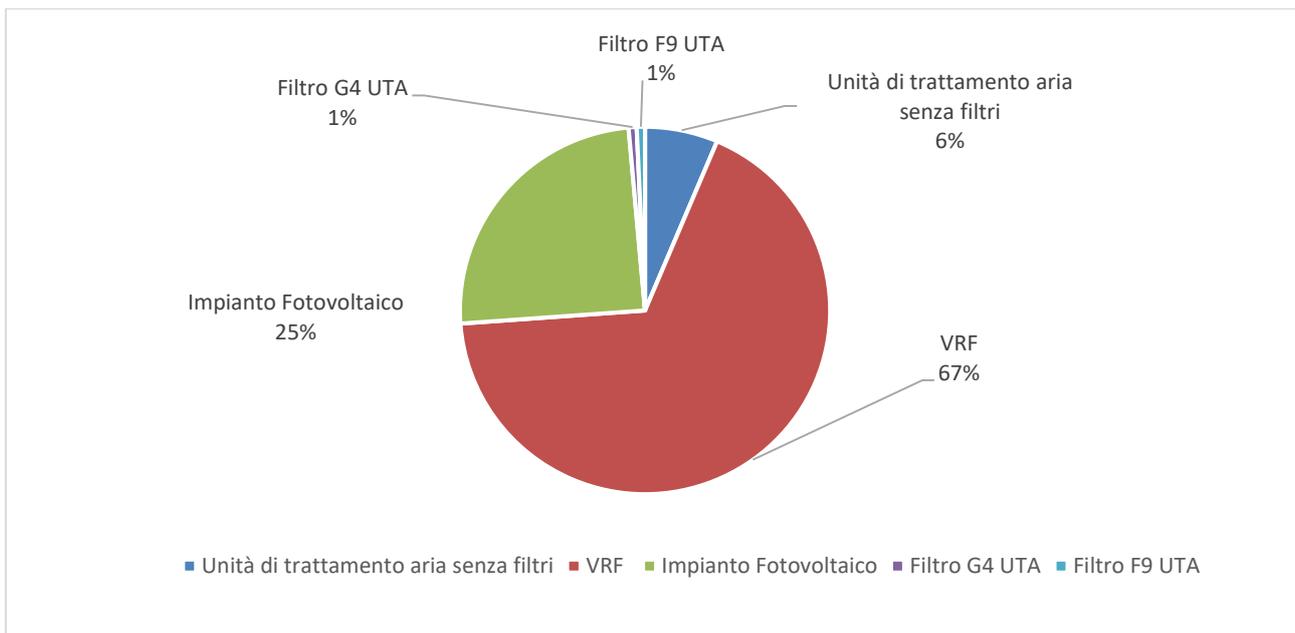


Figura 100 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d’impianto sostituiti sull’EE – Scenario sAE

Dall’analisi è emerso che nonostante l’elevato numero di sostituzioni dei filtri (120 volte durante la vita utile dell’edificio) l’energia incorporata per la sostituzione di tale componente ha un impatto trascurabile (circa il 2%) mentre l’impatto del VRF risulta dominante (circa il 63-67%).

Nelle figure 101-102 e 103-104 è illustrata, rispettivamente, l’incidenza dei componenti dell’impianto sostituiti sugli impatti ambientali negli scenari cAE e sAE.

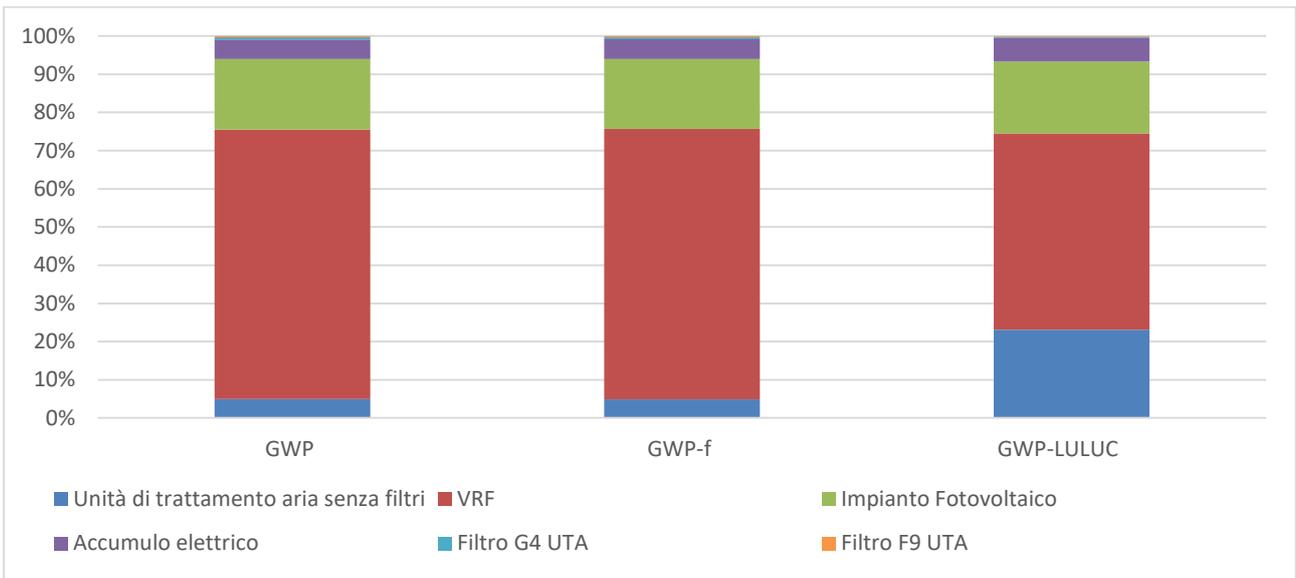


Figura 101 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d’impianto sostituiti sugli impatti ambientali GWP, GWP_f GWP_{LULUC} – Scenario cAE

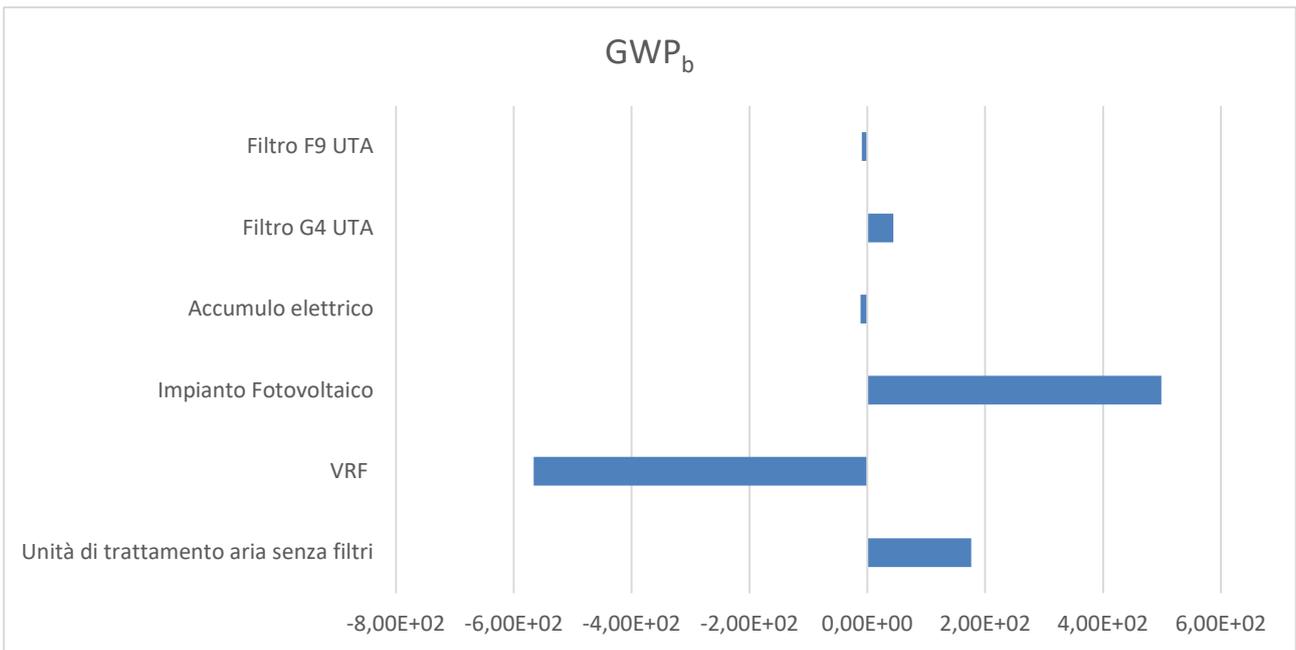


Figura 102 Analisi di contributo dei componenti d’impianto sostituiti sull’ impatto ambientale GWP_b – Scenario cAE

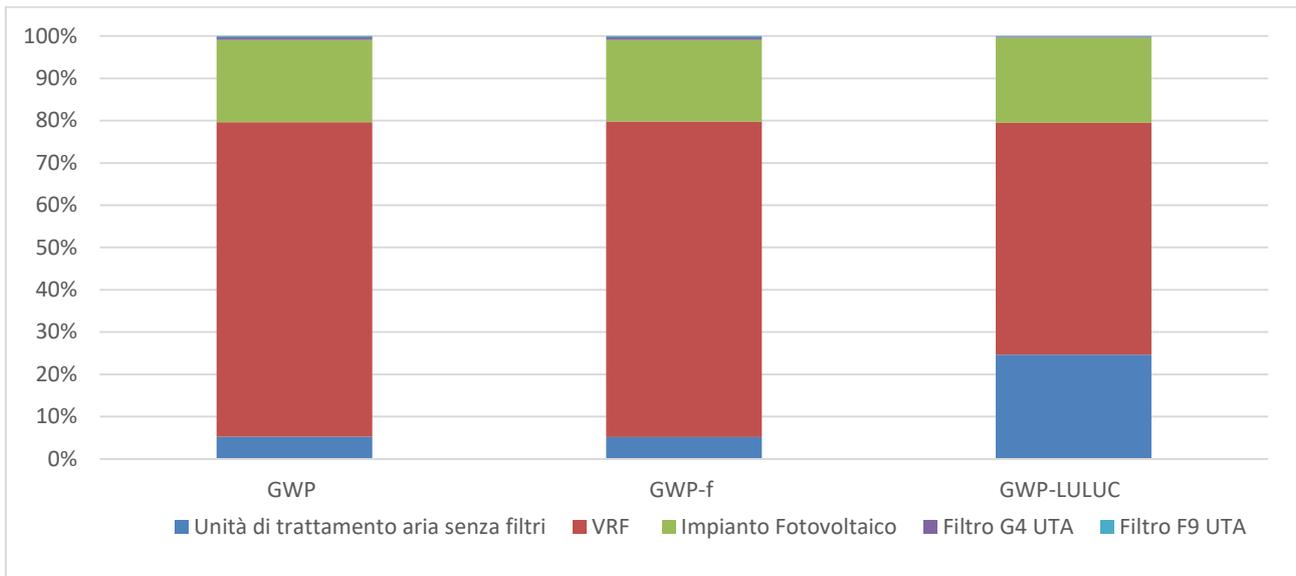


Figura 103 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti ambientali GWP, GWP_f, GWP_{LULUC} – Scenario SAE

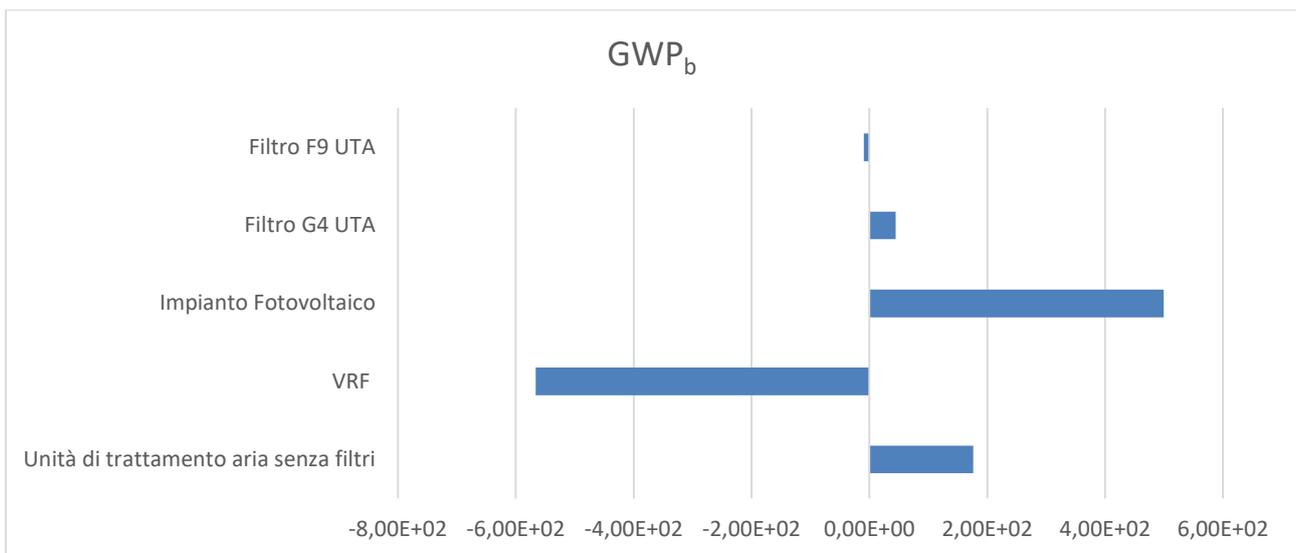


Figura 104 Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sull' impatto ambientale GWP_b – Scenario SAE

In entrambi gli scenari esaminati la sostituzione del VRF è responsabile del maggior contributo in tutte le categorie ambientali tranne nel GWP_b, sul quale incide negativamente a causa del legno utilizzato nelle infrastrutture della catena di approvvigionamento.

Nelle tabelle 46 e 47 è riportato il contributo agli impatti energetico – ambientali ripartito per fase di produzione e trattamento di fine vita di ogni componente sostituito, rispettivamente per gli scenari cAE e SAE.

Tabella 46 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti energetico – ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario cAE

Categoria di impatto	Unità trattamento aria senza filtri		VRF		Impianto Fotovoltaico		Sistema di accumulo	Filtro G4+ Filtro F9	
	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Produzione	Fine vita
EE	2,12E+05	2,55E+02	2,25E+06	7,62E+03	8,24E+05	5,96E+02	2,04E+05	4,75E+04	2,95E+02
GWP	1,24E+04	1,16E+03	1,76E+05	1,36E+04	4,61E+04	1,03E+03	1,28E+04	2,17E+03	7,27E+03
GWP _f	1,21E+04	1,16E+03	1,76E+05	1,36E+04	4,55E+04	1,03E+03	1,28E+04	2,13E+03	7,27E+03
GWP _b	1,76E+02	1,28E-01	-5,66E+02	7,22E+00	4,99E+02	1,76E+00	-1,15E+01	3,52E+01	1,84E-01
GWP _{LULUC}	1,09E+02	5,19E-03	2,42E+02	1,74E-01	8,87E+01	2,26E-02	2,97E+01	1,71E+00	7,28E-03

Tabella 47 Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti energetico – ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario sAE

Categoria di impatto	Unità trattamento aria senza filtri		VRF		Impianto Fotovoltaico		Filtro G4+ Filtro F9	
	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita	Produzione	Fine vita
EE	2,12E+05	2,55E+02	2,25E+06	7,62E+03	8,24E+05	5,96E+02	4,75E+04	2,95E+02
GWP	1,24E+04	1,16E+03	1,76E+05	1,36E+04	4,61E+04	1,03E+03	2,17E+03	7,27E+03
GWP _f	1,21E+04	1,16E+03	1,76E+05	1,36E+04	4,55E+04	1,03E+03	2,13E+03	7,27E+03
GWP _b	1,76E+02	1,28E-01	-5,66E+02	7,22E+00	4,99E+02	1,76E+00	3,52E+01	1,84E-01
GWP _{LULUC}	1,09E+02	5,19E-03	2,42E+02	1,74E-01	8,87E+01	2,26E-02	1,71E+00	7,28E-03

Dall'analisi dei dati è emerso che i trattamenti di fine vita (per ulteriori dettagli si rimanda al modulo C) determinano un contributo trascurabile in tutte le categorie esaminate.

Modulo B6 – Consumo di energia

Nelle tabelle 48 e 49 sono sintetizzati, rispettivamente, gli impatti sull'EE e gli impatti ambientali connessi al consumo di energia elettrica durante la fase d'uso dell'edificio.

Tabella 48 Modulo B6: Energia incorporata – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
EE	1,20E+07	1,27E+07	-6%
EE _{nr}	5,58E+06	6,63E+06	-16%
EE _r	6,42E+06	6,07E+06	6%

Tabella 49 Modulo B6: Impatti ambientali – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
GWP	3,81E+05	4,53E+05	-16%
GWP _f	3,51E+05	4,17E+05	-16%
GWP _b	2,99E+04	3,56E+04	-16%
GWP _{LULUC}	6,76E+01	8,03E+01	-16%

Nello scenario cAE si ha una riduzione del consumo di energia primaria rispetto allo scenario sAE pari al 6% e del GWP pari al 16%.

La presenza dell'accumulo elettrico consente di ridurre l'import di energia elettrica dalla rete, infatti, nello scenario cAE, l'energia primaria rinnovabile rappresenta il 54% dell'EE complessiva, mentre nello scenario sAE tale percentuale si riduce al 48%.

Gli impatti ambientali connessi agli usi energetici di fase d'uso si riducono nello scenario cAE rispetto allo scenario sAE poichè sono riconducibili al consumo di energia elettrica importata dalla rete, che è minore nel caso cAE.

6.3 Impatti energetico – ambientali – Modulo C

Energia incorporata – Trattamenti di fine vita dei componenti d’involucro

Nella tabella 50 sono sintetizzati i valori di energia incorporata connessi ai trattamenti di fine vita ipotizzati per i materiali costituenti l’involucro edilizio e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto a quelli dello scenario XPS.

Tabella 50 Modulo C: Energia incorporata nei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria	Scenario XPS	Scenario FC	(Scenario FC-Scenario XPS) /Scenario XPS
EE	4,62E+05	4,63E+05	0,32%
EE _r	4,55E+05	4,56E+05	0,32%
EE _{nr}	7,07E+03	7,09E+03	0,31%

Dall’analisi dei dati è emerso che le differenze ottenute sono di entità trascurabile.

Nelle figure 105 e 106 è illustrata, rispettivamente, l’incidenza dei componenti dell’involucro edilizio sull’EE negli scenari XPS e FC.

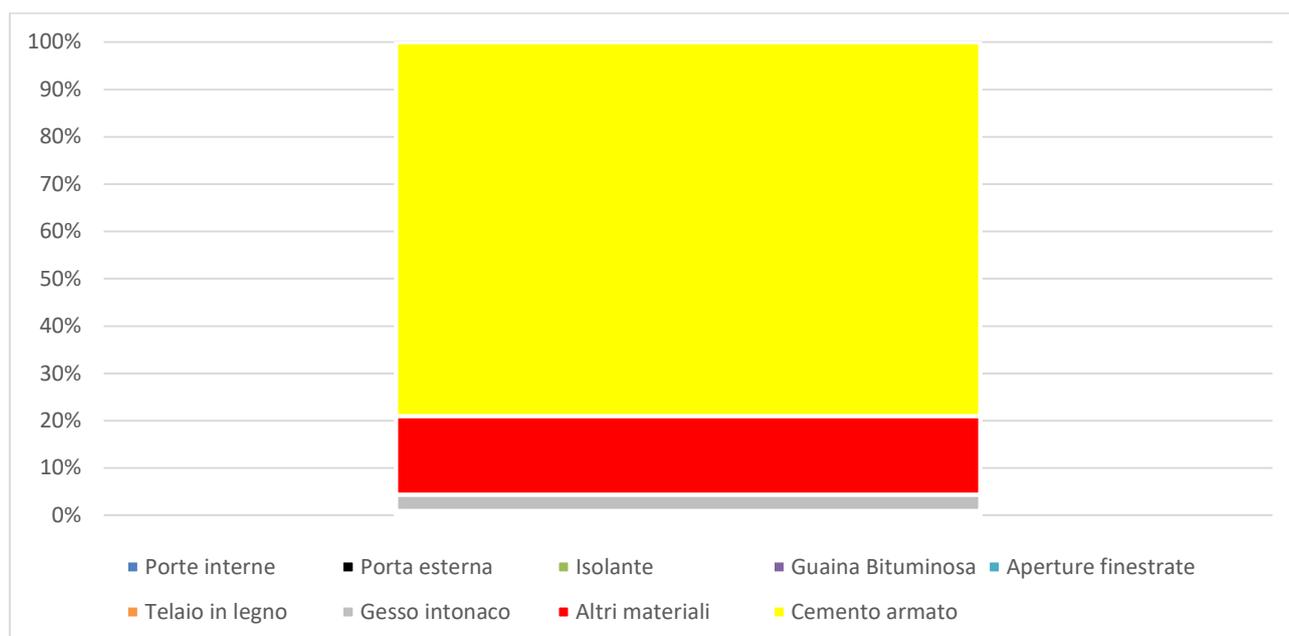


Figura 105 Modulo C: Analisi di contributo all’EE dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS

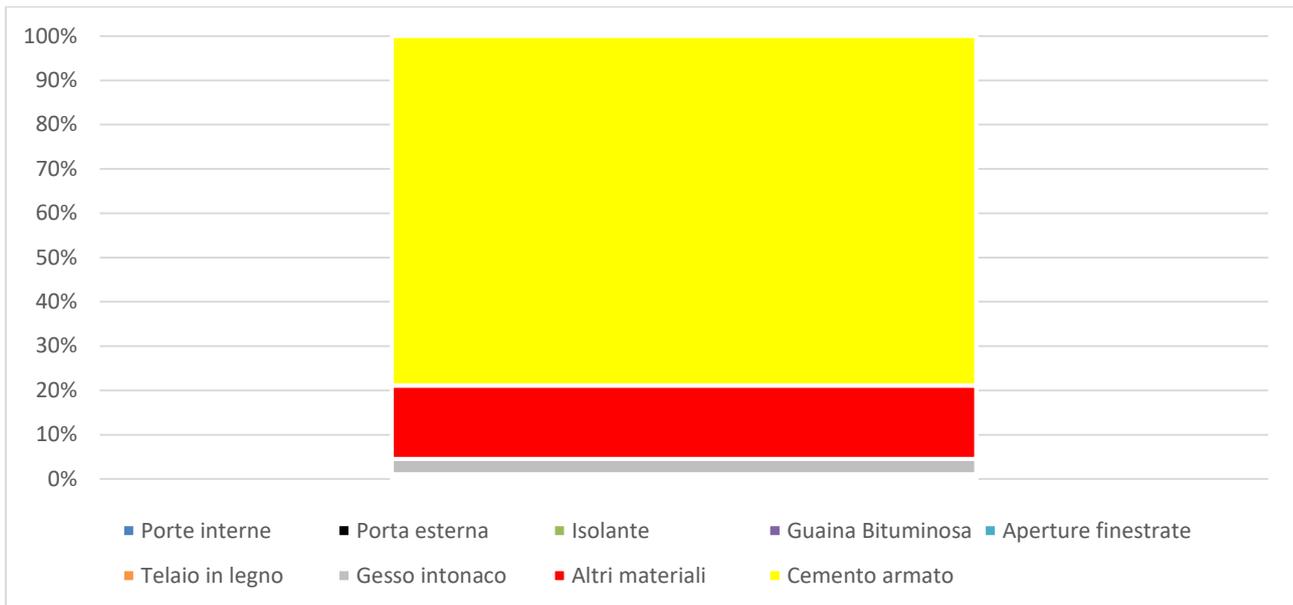


Figura 106 Modulo C: Analisi di contributo all'EE dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario FC

Dall'analisi è emerso che, in entrambi gli scenari, il trattamento di fine vita del cemento armato contribuisce per il 79% al consumo di energia primaria, seguono i trattamenti di fine vita degli "altri materiali" che includono la malta cementizia, la ceramica e il laterizio forato con un contributo all'EE pari a circa il 17% e gesso intonaco con un contributo pari al 3%. Il contributo del trattamento degli altri componenti di involucro è inferiore all'1%.

Impatti ambientali – Trattamenti di fine vita dei componenti d'involucro

Nella tabella 51 sono sintetizzati i valori degli impatti ambientali connessi ai trattamenti di fine vita ipotizzati per i materiali costituenti l'involucro edilizio e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto a quelli dello scenario XPS.

Tabella 51 Modulo C: Impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria	Scenario XPS	Scenario FC	(Scenario FC-Scenario XPS) /Scenario
			XPS
GWP	2,40E+04	2,41E+04	0,23%
GWP _f	2,09E+04	2,10E+04	0,26%
GWP _b	3,05E+03	3,05E+03	0,01%
GWP _{LULUC}	3,83E+00	3,84E+00	0,28%

Dall'analisi dei dati emerge che le differenze tra i valori di categorie di impatto esaminate sono di entità trascurabile.

In figura 107 e 108 è illustrato il contributo agli impatti ambientali del trattamento di fine vita di ogni materiale, rispettivamente, per gli scenari XPS e FC.

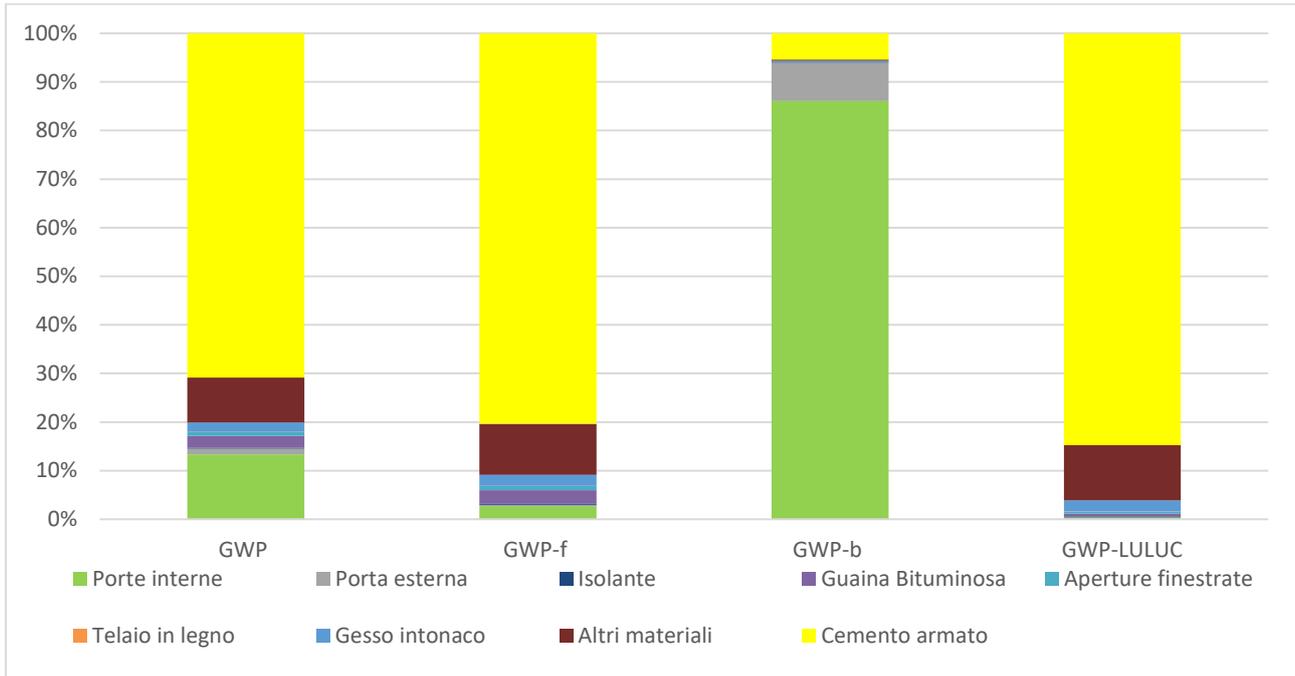


Figura 107 Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS

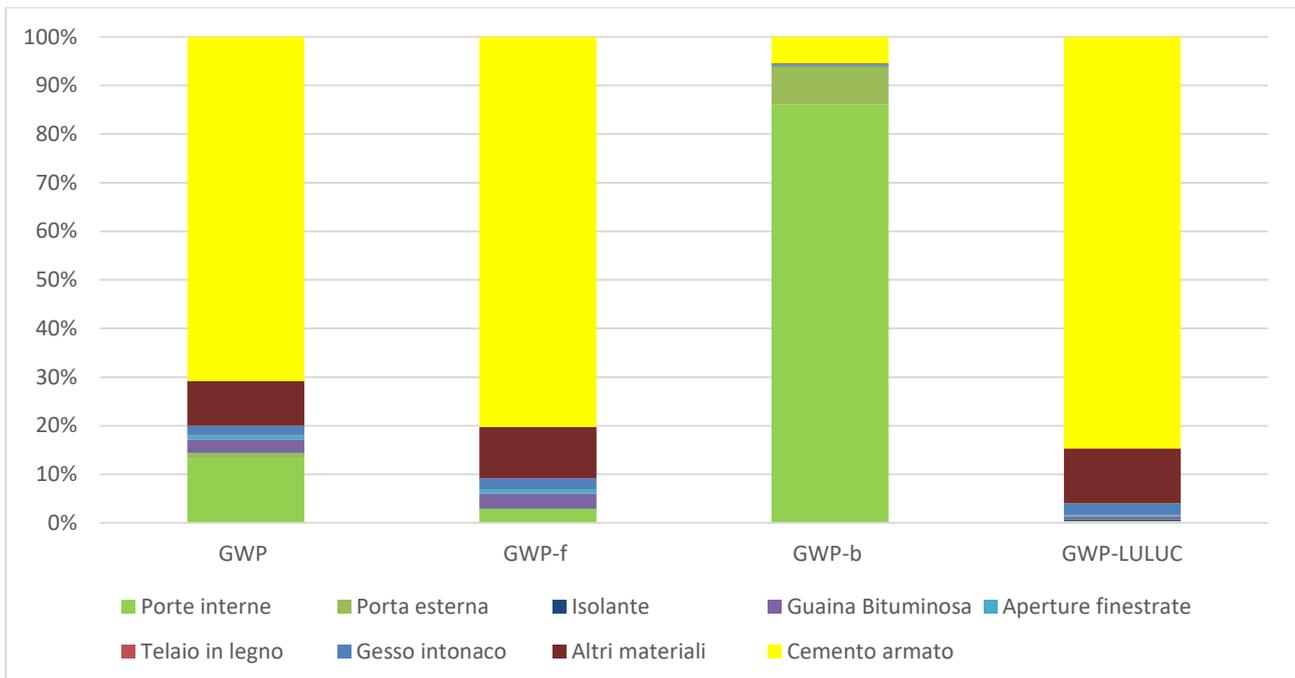


Figura 108 Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario FC

In entrambi gli scenari considerati, il trattamento di fine vita del cemento armato è responsabile del maggior contributo in quasi tutti gli impatti ambientali. In dettaglio, tale contributo varia da un valore minimo pari al 5% sulla categoria “cambiamento climatico biogenico” ad un valore massimo pari all’85% sulla categoria “cambiamento climatico contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”.

Il trattamento di fine vita delle porte interne incide per il 13% all’impatto sulla categoria “cambiamento climatico” in entrambi gli scenari esaminati e ha un impatto pari a circa l’80% nella categoria “cambiamento climatico biogenico”.

Il trattamento di fine vita della malta cementizia, della ceramica e del laterizio forato (“altri materiali”) incide con percentuali variabili tra un valore minimo pari allo 0,2% sulla categoria “cambiamento climatico biogenico” ad un valore massimo pari all’ 11% sulla categoria “cambiamento climatico fossile” e “cambiamento climatico contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”, in entrambi gli scenari esaminati.

Il trattamento di fine vita degli isolanti (trattamento rifiuto inerte) incide in entrambi gli scenari in maniera marginale in tutti gli impatti ambientali.

Il contributo agli impatti del trattamento di fine vita dei rimanenti componenti di involucro è minore del 3% in tutte le categorie ambientali.

Trattamenti di fine vita dei componenti d’impianto

Nelle tabelle 52 e 53 sono sintetizzati gli impatti energetico – ambientali connessi ai trattamenti di fine vita ipotizzati per i componenti di impianto.

Gli impatti sono uguali in entrambi gli scenari, e sono connessi allo smaltimento finale del VRF, dell’unità di trattamento aria e dell’impianto fotovoltaico.

Per il sistema di accumulo elettrico è stato applicato un cut off in accordo all’approccio “Recycled content, cut-off”, ipotizzando un trattamento di riciclo a fine vita.

Tabella 52 Modulo C: Energia incorporata dei trattamenti di fine vita dei componenti d’impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria	Trattamento di fine vita dei componenti di impianto
EE (MJ)	3,22E+03
EE _{nr} (MJ)	3,05E+03
EE _r (MJ)	1,68E+02

L’energia incorporata è pari a 3,22E+03 MJ di energia primaria di cui il 95% costituito da energia primaria non rinnovabile.

Tabella 53 Modulo C: Impatti ambientali dei trattamenti dei trattamenti di fine vita dei componenti d’impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria d’impatto	Trattamento di fine vita dei componenti di impianto
GWP	5,97E+03
GWP _f	5,97E+03
GWP _b	4,21E+00
GWP _{LULUC}	8,23E-02

Nelle figure 109 e 110 è illustrata, rispettivamente, l’incidenza dei componenti d’impianto sull’EE e sugli impatti ambientali connessi al trattamento di fine vita dell’impianto.

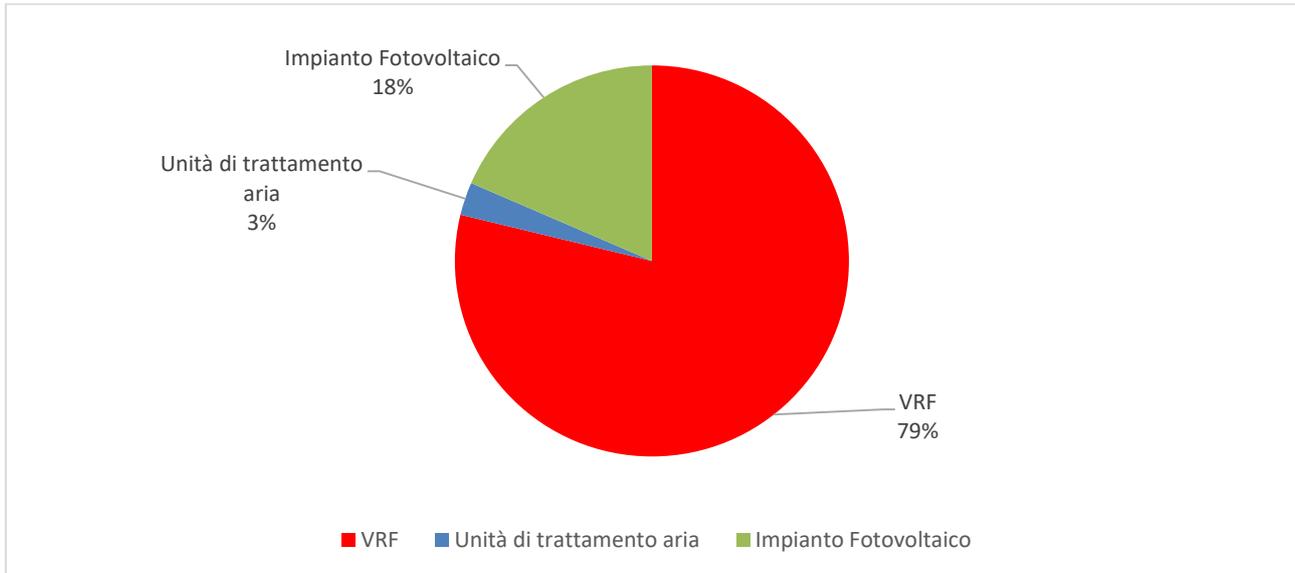


Figura 109 Modulo C: Analisi di contributo all'EE dei trattamenti di fine vita dei componenti di impianto

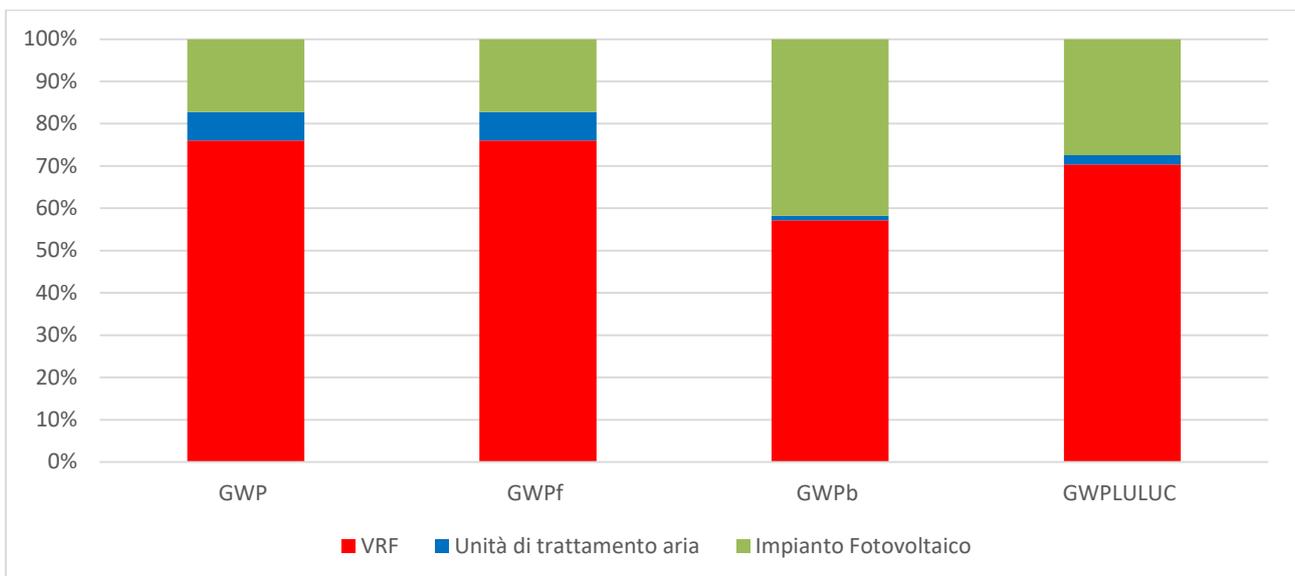


Figura 110 Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di impianto

Dall'analisi dei dati è emerso che il trattamento di fine vita del VRF è responsabile del maggior contributo agli impatti energetico – ambientali. In dettaglio, incide per il 79% sull'EE e rappresenta percentuali variabili da un valore minimo pari al 57% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico" ad un valore massimo pari al 76% sul "cambiamento climatico" e "cambiamento climatico fossile". Il trattamento di fine vita dell'impianto fotovoltaico contribuisce agli impatti ambientali con percentuali variabili da un valore minimo del 17% sul "cambiamento climatico" ad un valore massimo pari al 42% sul "cambiamento climatico biogenico".

Di seguito è riportata la descrizione dettagliata dei contributi agli impatti energetico – ambientali relativi ai singoli componenti di impianto.

VRF

Nella figura 111 è illustrata l'analisi di contributo dei singoli componenti del VRF agli impatti energetico – ambientali connessi al trattamento di fine vita.

Per il rame contenuto nelle tubazioni e nel sistema di derivazione, per il quale si è ipotizzato un trattamento di riciclo a fine vita, è stato applicato un cut-off.

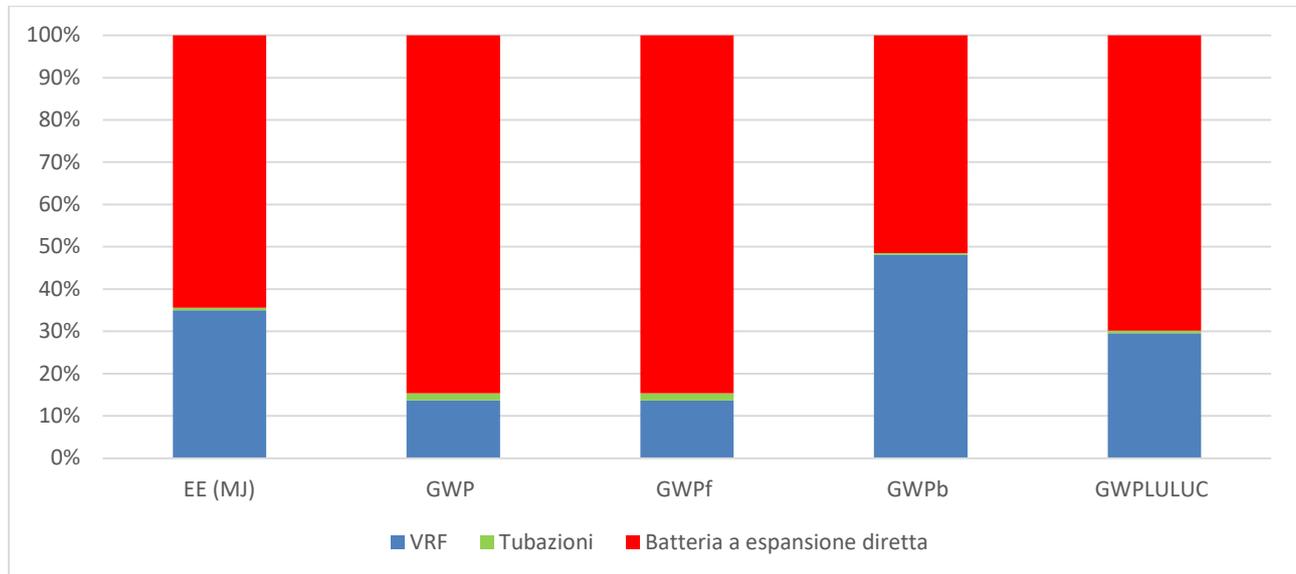


Figura 111 Modulo C: Analisi di contributo all'energia incorporata e agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti del VRF

Il trattamento di fine vita delle batterie ad espansione diretta è responsabile del maggior contributo agli impatti energetico-ambientali.

In dettaglio tale processo è responsabile di un contributo variabile tra il 52% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico" e l'85% sulle categorie "cambiamento climatico fossile" e "cambiamento climatico".

Il trattamento di fine vita del VRF contribuisce agli impatti ambientali con percentuali variabili da un valore minimo pari al 14% sulla categoria "cambiamento climatico fossile" ad un valore massimo pari al 48% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico".

Inoltre, nel calcolo dell'energia incorporata nel trattamento di fine vita del VRF i componenti incidono con percentuali che vanno dal 2% per il rame al 61% per l'acciaio mentre il fluido refrigerante è responsabile del 27% dell'impatto.

Il trattamento di fine vita del fluido refrigerante incide inoltre con percentuali variabili dal 9% sulla categoria "cambiamento climatico" al 91% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico". Il trattamento di fine vita delle parti in rame e in acciaio del VRF contribuisce agli impatti ambientali con percentuali variabili da un valore minimo di circa il 5% sulla categoria "cambiamento climatico" ad un valore massimo pari al 23% sulla categoria "contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo".

Unità di trattamento aria

Nella figura 112 è illustrata l'analisi di contributo dei singoli componenti dell'unità di trattamento aria agli impatti energetico – ambientali connessi al trattamento di fine vita.

Per il rame contenuto nel recuperatore di calore per il quale si è ipotizzato un trattamento di riciclo a fine vita, è stato applicato un cut-off.

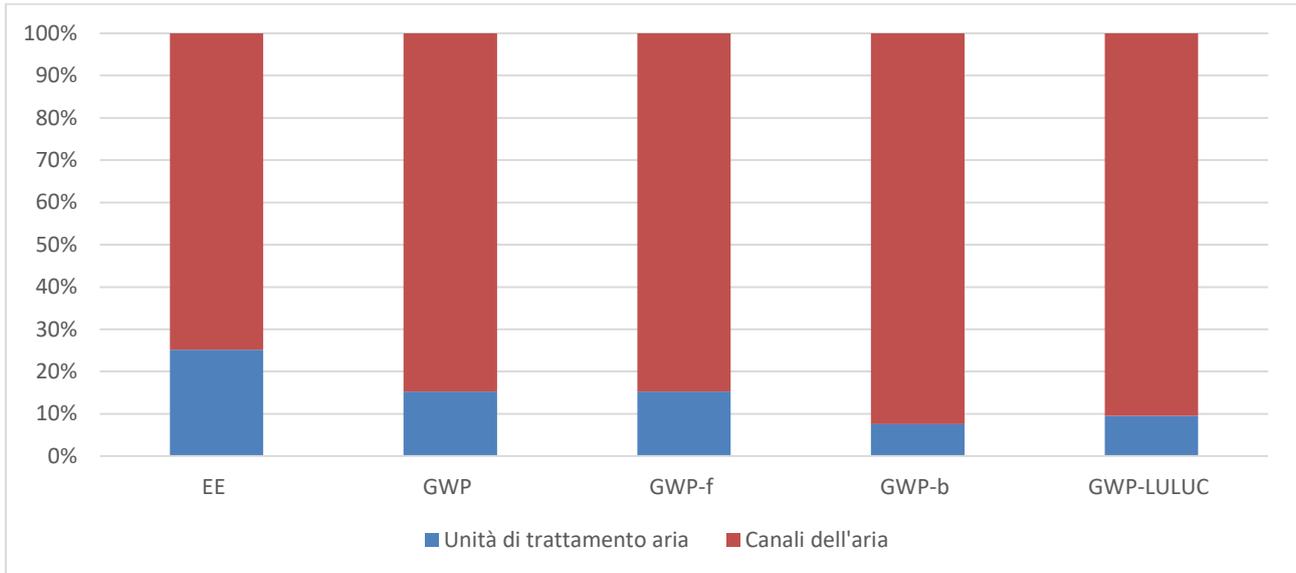


Figura 112 Modulo C: Analisi di contributo all'energia incorporata e agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'unità di trattamento aria

Il trattamento di fine vita dei canali dell'aria è responsabile del maggior contributo agli impatti energetico-ambientali, in dettaglio è responsabile di un contributo variabile tra il 75% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico" e un valore massimo pari al 92% sulla categoria "cambiamento climatico fossile".

Impianto fotovoltaico

Nella figura 113 è illustrata l'analisi di contributo dei singoli componenti dell'impianto fotovoltaico agli impatti energetico – ambientali connessi al trattamento di fine vita.

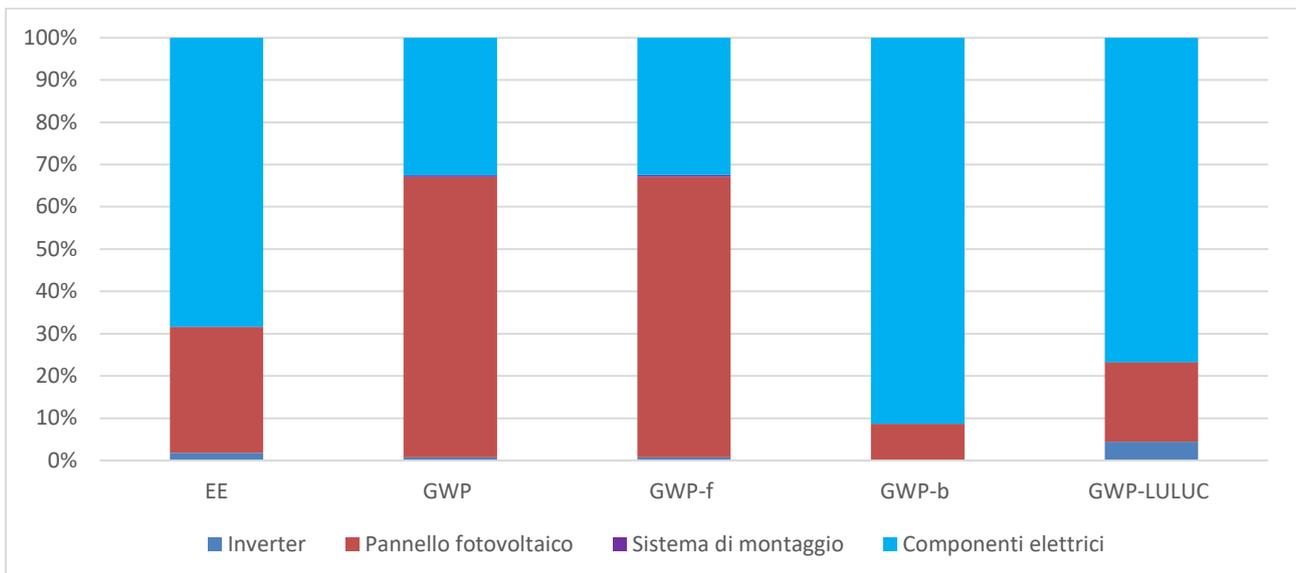


Figura 113 Modulo C: Analisi di contributo all'energia incorporata e agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'impianto fotovoltaico

I componenti elettrici sono responsabili di un contributo agli impatti ambientali variabile da un valore minimo pari al 32% sulla categoria "cambiamento climatico fossile" ad un valore massimo pari al 91% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico". Il trattamento di fine vita dei pannelli fotovoltaici incide con percentuali variabili da un valore minimo pari al 9% sulla categoria "cambiamento climatico biogenico" ad un valore

massimo pari al 66% sulle categorie “cambiamento climatico” e “cambiamento climatico fossile”. Infine, i trattamenti di fine vita dell’inverter e del sistema di montaggio hanno contributi inferiori al 2% all’impatto in quasi su tutte le categorie esaminate.

6.4 Benefici energetico – ambientali – Modulo D

Nella tabella 54 sono riportati i benefici energetico-ambientali, espressi in termini di impatti ambientali evitati, connessi all’immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall’impianto fotovoltaico.

Tabella 54 Modulo D: benefici ambientali in termini di impatti evitati connessi all’immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall’impianto fotovoltaico

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE
EE (MJ)	-8,92E+06	-1,05E+07
GWP (kg CO _{2eq})	-4,72E+05	-5,57E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	-4,35E+05	-5,13E+05
GWP _b (kg CO _{2eq})	-3,71E+04	-4,37E+04
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	-8,38E+01	-9,88E+01

I benefici energetico- ambientali sono maggiori nello scenario sAE poiché l’assenza di un sistema di accumulo elettrico permette di incrementare la quota di energia rinnovabile generata in situ che viene immessa in rete rispetto allo scenario cAE.

6.5 Impatti energetico – ambientali di ciclo di vita

In questa sezione sono illustrati gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita riferiti all’unità funzionale nelle due configurazioni esaminate

Nella tabella 55 sono sintetizzati i valori di energia incorporata riferiti all’unità funzionale in entrambe le configurazioni.

Tabella 55 Energia incorporata di ciclo di vita – Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria	Configurazione 1	Configurazione 2
EE (MJ)	2,34E+07	2,22E+07
EE _{nr} (MJ)	1,57E+07	1,48E+07
EE _r (MJ)	7,69E+06	7,35E+06

Dall’analisi è emerso che nella configurazione 1 l’EE di ciclo di vita è pari a 2,34E+07 MJ mentre nella configurazione 2 l’EE di ciclo di vita è pari a 2,22E+07 MJ, in entrambe le configurazioni il 67% di EE è costituito da energia primaria non rinnovabile. La configurazione 1 presenta un valore di EE maggiore del 5% rispetto alla configurazione 2.

Per un’analisi più dettagliata, nelle tabelle 56 e 57 sono riportati i contributi delle fasi del ciclo di vita al consumo totale di energia primaria distinti per moduli e per componenti d’impianto e di involucro.

Tabella 56 Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria	Modulo A	Modulo B4	Modulo B6	Modulo C
EE -Conf. 1 (MJ)	5,91E+06	5,05E+06	1,20E+07	4,65E+05
EE -Conf. 2 (MJ)	4,99E+06	4,02E+06	1,27E+07	4,67E+05

Tabella 57 Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria	Modulo A		Modulo B4		Modulo B6	Modulo C	
	Involucro	Impianto	Involucro	Impianto	Consumo energetico	Involucro	Impianto
EE -Conf. 1 (MJ)	4,17E+06	1,75E+06	1,50E+06	3,55E+06	1,20E+07	4,62E+05	3,22E+03
EE -Conf. 2 (MJ)	3,35E+06	1,64E+06	6,78E+05	3,34E+06	1,27E+07	4,63E+05	3,22E+03

Nel dettaglio, la fase di produzione dei componenti di involucro e di impianto (modulo A) è minore nella configurazione 2 di circa il 18% rispetto alla configurazione 1. L'EE connessa agli interventi di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto (modulo B4) è minore nella configurazione 2 di circa il 26% rispetto alla configurazione 1.

Nella fase B6 l'EE della configurazione 2 è maggiore della configurazione 1 di circa il 6% poiché una quota maggiore di consumo energetico è soddisfatto da energia elettrica importata dalla rete, che presenta per kWh un impatto maggiore in termini di consumo di energia primaria rispetto all'energia elettrica generata dall'impianto fotovoltaico. Le variazioni di EE connesse ai trattamenti di fine vita dei componenti di involucro e di impianto sono trascurabili. In particolare, l'EE dei trattamenti di fine vita connessa alla configurazione 2 è maggiore dello 0,3% rispetto alla configurazione 1. Pertanto, sebbene la configurazione 2 presenti valori maggiori di EE nella fase d'uso (modulo B6), le fasi di produzione (modulo A) e di sostituzione (modulo B4) compensano la differenza di EE incorporata di ciclo di vita. Nelle figure 114 e 115 sono riportati i contributi percentuali delle fasi del ciclo di vita al consumo totale di energia primaria, rispettivamente, per la configurazione 1 e 2.

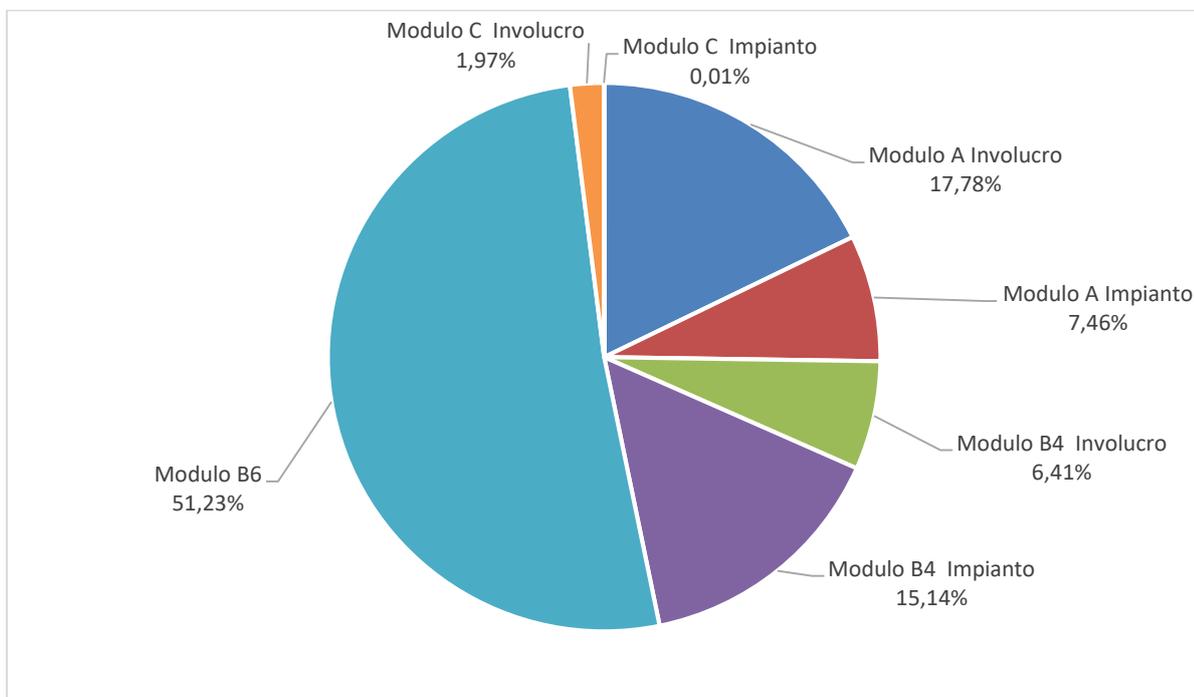


Figura 114 Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1

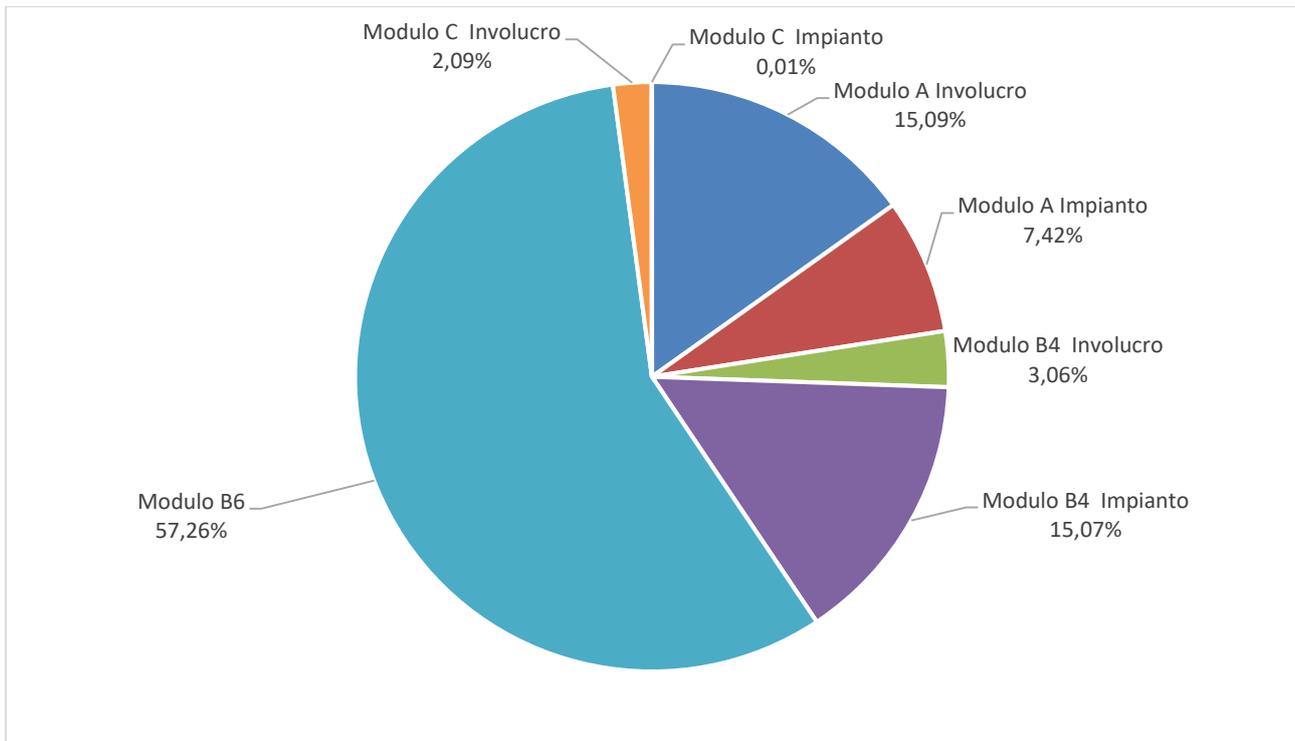


Figura 115 Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 2

In entrambe le configurazioni esaminate la fase d'uso (modulo B6) è responsabile del maggior contributo all'EE di ciclo di vita. In dettaglio, essa incide con percentuali pari a circa il 51% nella configurazione 1 e al 57% nella configurazione 2. La fase di produzione dei componenti d'involucro (modulo A involucro) e di impianto (modulo A impianto) incidono rispettivamente sull'EE con percentuali pari a circa il 17% e 7% nella configurazione 1 e al 15% e 7% nella configurazione 2. La fase d'uso, che include gli interventi di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto (modulo B4) incide sull'EE con percentuali pari a circa il 21% nella configurazione 1 e 18% nella configurazione 2.

I trattamenti di fine vita dei componenti di involucro ed impianto incidono sull'EE per meno del 2,3% in entrambe le configurazioni esaminate.

Nella tabella 58 sono sintetizzati gli impatti ambientali di ciclo di vita connessi all'unità funzionale in entrambe le configurazioni esaminate e le variazioni percentuali degli impatti connessi alla configurazione 1 rispetto alla 2.

Tabella 58 Impatti ambientali di ciclo di vita – Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria	Configurazione 1	Configurazione 2	(Configurazione 1 – Configurazione 2)/ Configurazione 2
GWP (kg CO _{2eq})	1,23E+06	1,19E+06	4%
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,22E+06	1,16E+06	4%
GWP _b (kg CO _{2eq})	1,79E+04	2,03E+04	-12%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,18E+03	1,16E+03	2%

La configurazione 2 presenta prestazioni ambientali migliori in quasi tutte le categorie di impatto esaminate ad eccezione della categoria "cambiamento climatico – biogenico".

In dettaglio, le prestazioni ambientali migliorano da un valore minimo pari a circa il 2% per il GWP_{LULUC} ad un massimo del 4% per il GWP e GWP_f .

La categoria d'impatto ambientale GWP_b invece peggiora del 12% a causa della mancanza dell'accumulo elettrico che incide negativamente in questa categoria.

Nelle tabelle 59, 60 61 e 62 sono riportati i contributi delle fasi del ciclo di vita agli impatti ambientali distinti per moduli e per componenti d'impianto e di involucro, rispettivamente per la configurazione 1 e 2.

Tabella 59 Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1

Categoria	Modulo A	Modulo B4	Modulo B6	Modulo C
GWP (kg CO_{2eq})	4,47E+05	3,77E+05	3,81E+05	3,00E+04
GWP_f (kg CO_{2eq})	4,60E+05	3,77E+05	3,51E+05	2,69E+04
GWP_b (kg CO_{2eq})	-1,37E+04	-1,42E+03	2,99E+04	3,06E+03
GWP_{LULUC} (kg CO_{2eq})	5,32E+02	5,77E+02	6,76E+01	3,91E+00

Tabella 60 Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1

Categoria	Modulo A		Modulo B4		Consumo energetico	Modulo C	
	Involucro	Impianto	Involucro	Impianto		Involucro	Impianto
GWP (kg CO_{2eq})	3,31E+05	1,15E+05	1,04E+05	2,72E+05	3,81E+05	2,40E+04	5,97E+03
GWP_f (kg CO_{2eq})	3,45E+05	1,15E+05	1,06E+05	2,72E+05	3,51E+05	2,09E+04	5,97E+03
GWP_b (kg CO_{2eq})	-1,41E+04	3,64E+02	1,56E+03	1,43E+02	2,99E+04	3,05E+03	4,21E+00
GWP_{LULUC} (kg CO_{2eq})	3,12E+02	2,20E+02	1,06E+02	4,71E+02	6,76E+01	3,83E+00	8,23E-02

Tabella 61 Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 2

Categoria	Modulo A	Modulo B4	Modulo B6	Modulo C
GWP (kg CO_{2eq})	4,04E+05	2,99E+05	4,53E+05	3,00E+04
GWP_f (kg CO_{2eq})	4,19E+05	3,01E+05	4,17E+05	2,70E+04
GWP_b (kg CO_{2eq})	-1,54E+04	-3,01E+03	3,56E+04	3,06E+03
GWP_{LULUC} (kg CO_{2eq})	5,21E+02	5,51E+02	8,03E+01	3,92E+00

Tabella 62 Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 2

Categoria	Modulo A		Modulo B4		Consumo energetico	Modulo C	
	Involucro	Impianto	Involucro	Impianto		Involucro	Impianto
GWP (kg CO_{2eq})	2,95E+05	1,09E+05	3,93E+04	2,60E+05	4,53E+05	2,41E+04	5,97E+03
GWP_f (kg CO_{2eq})	3,11E+05	1,08E+05	4,24E+04	2,59E+05	4,17E+05	2,10E+04	5,97E+03
GWP_b (kg CO_{2eq})	-1,57E+04	3,70E+02	-3,16E+03	1,54E+02	3,56E+04	3,05E+03	4,21E+00
GWP_{LULUC} (kg CO_{2eq})	3,16E+02	2,06E+02	1,10E+02	4,41E+02	8,03E+01	3,84E+00	8,23E-02

I contributi negativi alla categoria d'impatto ambientale GWP_b , sono dovuti alla presenza del legno nelle porte e alla catena produttiva del laterizio forato.

Nelle figure 116 – 117 e 118 – 119 sono riportati i contributi percentuali delle fasi del ciclo di vita, rispettivamente, per la configurazione 1 e 2.

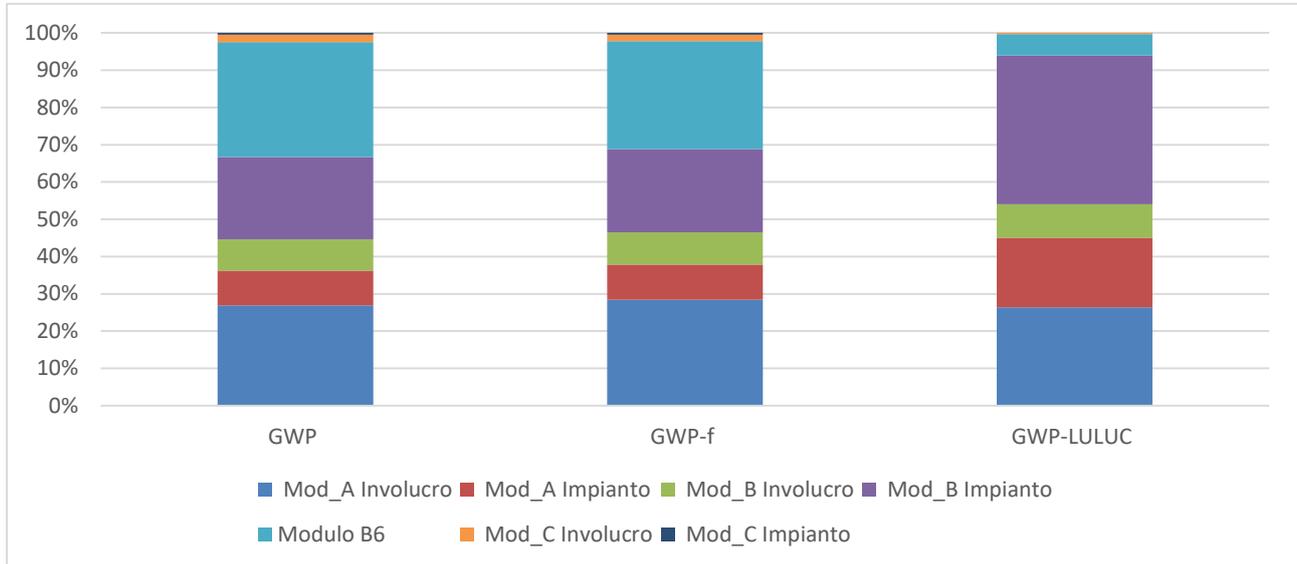


Figura 116 Impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1

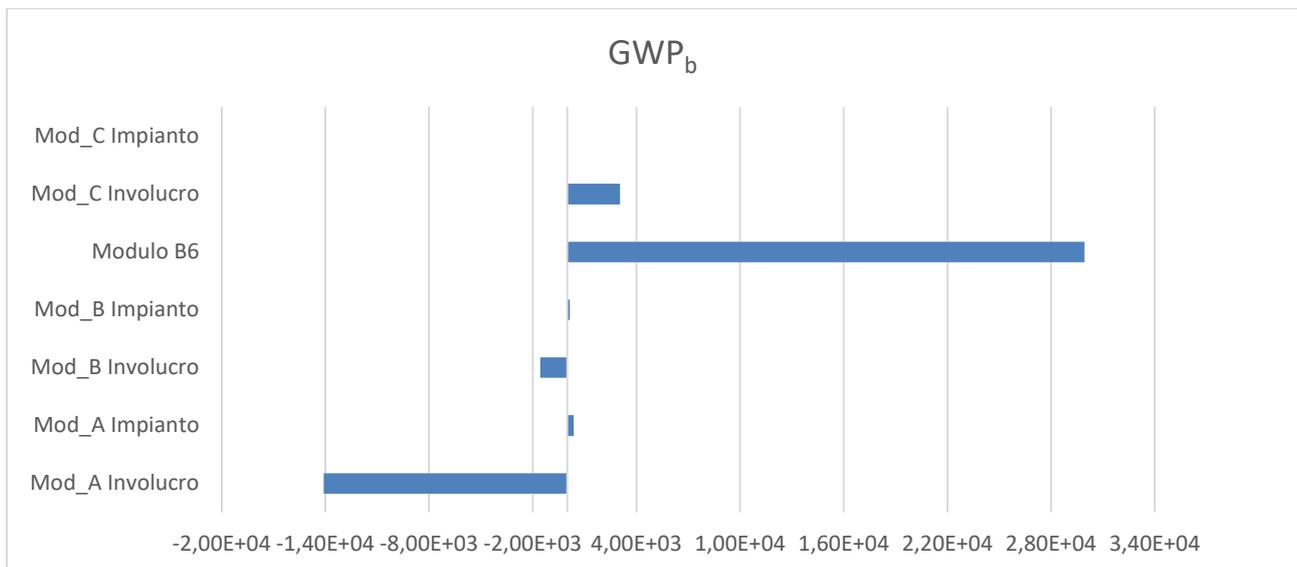


Figura 117 Impatti ambientali GWP_b di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 1

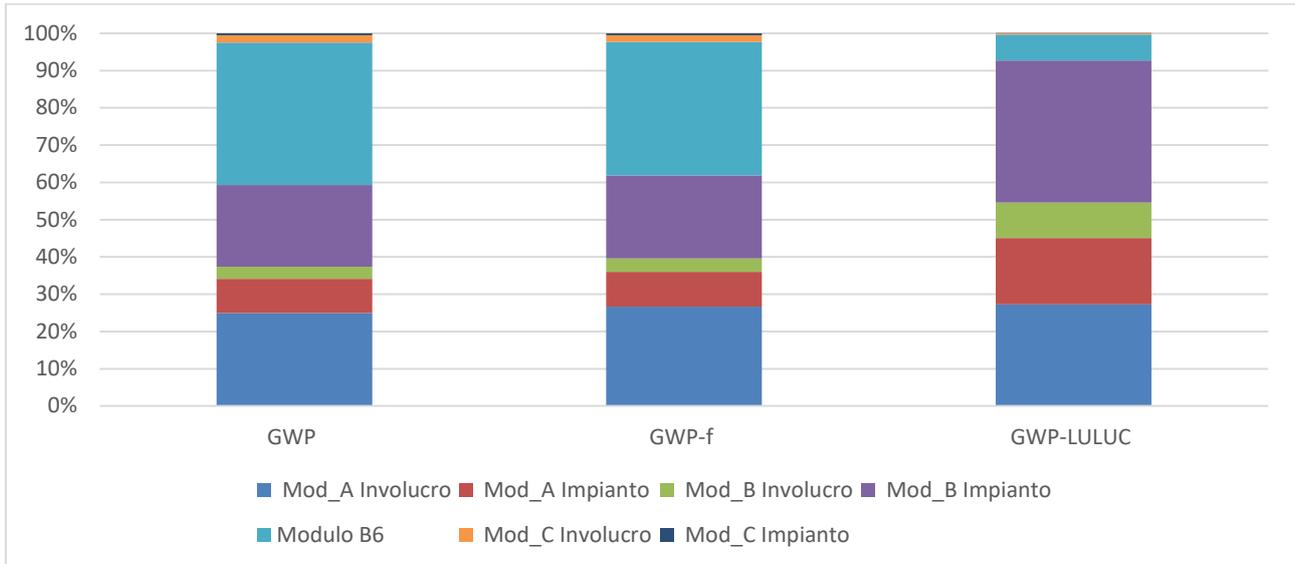


Figura 118 Impatti ambientali GWP, GWP_f e GWP_{LULUC} di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 2

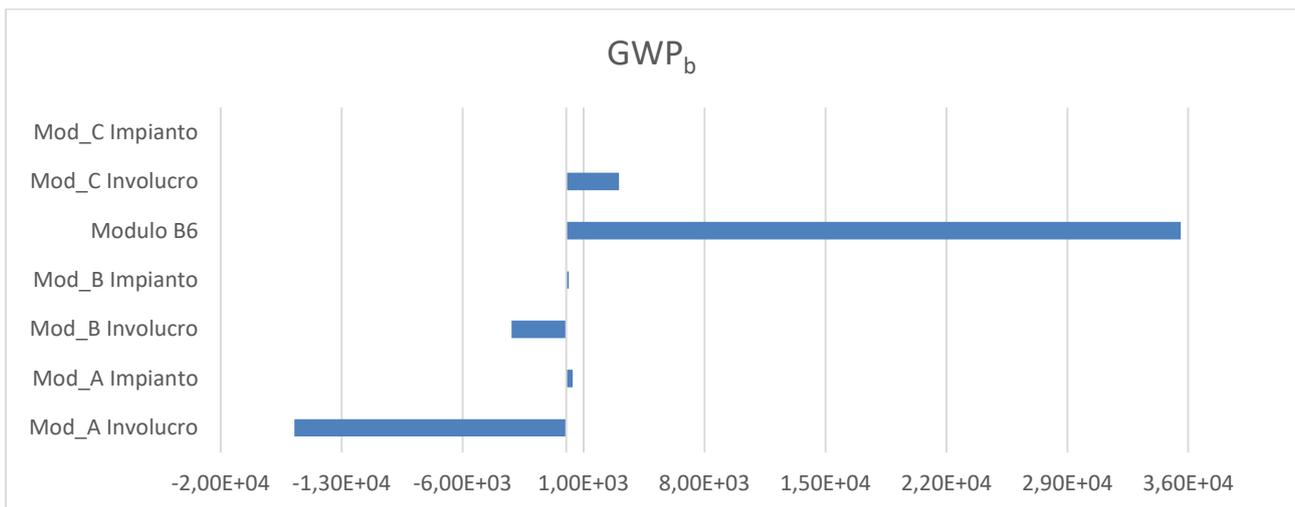


Figura 119 Impatti ambientali GWP_b di ciclo di vita – Analisi di contributo – Configurazione 2

Nella configurazione 1 il modulo B6 (relativo al consumo energetico) è responsabile del maggiore contributo al GWP_b, il Modulo A (relativo alla produzione dei componenti d'impianto e di involucro) ha un impatto maggiore nelle categorie d'impatto GWP e GWP_f, il modulo B4 ha un impatto maggiore nella categoria GWP_{LULUC}.

Nella configurazione 2 il modulo B6 (relativo al consumo energetico) è responsabile del maggiore contributo al GWP e al GWP_b, il Modulo A (relativo alla produzione dei componenti d'impianto e di involucro) ha un impatto maggiore nella categoria d'impatto GWP_f, il modulo B4 ha un impatto maggiore nella categoria GWP_{LULUC}.

In particolare, nella configurazione 1 il modulo B6 varia da un valore minimo pari a circa il 5% sulla categoria sopracitata ad un valore massimo pari a circa il 30% sulla categoria "Cambiamento climatico" mentre nella configurazione 2 tale percentuale varia da un minimo di circa il 7% "Cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo" ad un massimo pari al 38% "Cambiamento climatico".

Il (Modulo A Involucro) è il secondo modulo con contributo maggiore e incide sugli impatti con contributi variabili tra il 24% e il 27% nella configurazione 1 e tra il 26% e il 28% nella configurazione 2 rispettivamente

sulle categorie “Cambiamento climatico” e “Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”.

In entrambe le configurazioni il contributo maggiore alla categoria d’impatto “Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo” è dato dal (Modulo B4 Impianto), responsabile nella configurazione 1 di circa il 40% dei contributi e di circa il 38% nella configurazione 2.

La sostituzione dei componenti d’involucro (Modulo B4 Involucro) solamente nella categoria “Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo” “incide per più del 10%.

La fase di produzione dei componenti di impianto (Modulo A Impianto) incide in entrambe le configurazioni con percentuali variabili da un valore minimo pari a circa il 9% sul “Cambiamento climatico” ad un valore massimo pari al 18% sul “Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”, in entrambe le configurazioni esaminate. Infine, i trattamenti di fine vita dei componenti di involucro e di impianto incidono sugli impatti ambientali con contributi inferiori al 3% in tutte le categorie ambientali.

Nelle tabelle 63 e 64 sono sintetizzati gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita e gli impatti evitati (Modulo D) per entrambe le configurazioni.

Tabella 63 Impatti ambientali di ciclo di vita e crediti ambientali – Configurazione 1

Categoria di impatto	Ciclo di vita	Crediti ambientali (Modulo D)	Ciclo di vita incluso Modulo D
EE (MJ)	2,34E+07	-8,92E+06	1,45E+07
GWP (kg CO _{2eq})	1,23E+06	-4,72E+05	7,62E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,22E+06	-4,35E+05	7,80E+05
GWP _b (kg CO _{2eq})	1,79E+04	-3,71E+04	-1,92E+04
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,18E+03	-8,38E+01	1,10E+03

Tabella 64 Impatti ambientali di ciclo di vita e crediti ambientali – Configurazione 2

Categoria di impatto	Ciclo di vita	Crediti ambientali (Modulo D)	Ciclo di vita incluso Modulo D
EE (MJ)	2,22E+07	-1,05E+07	1,17E+07
GWP (kg CO _{2eq})	1,19E+06	-5,57E+05	6,29E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,16E+06	-5,13E+05	6,51E+05
GWP _b (kg CO _{2eq})	2,03E+04	-4,37E+04	-2,34E+04
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,16E+03	-9,88E+01	1,06E+03

I benefici ambientali sono maggiori nella configurazione 2 rispetto alla 1 poiché in assenza di un sistema di accumulo è maggiore la quota di energia rinnovabile generata in situ che viene immessa in rete.

Nella configurazione 1 i crediti ambientali riducono gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita di percentuali variabili dal 62% sulle categorie “energia incorporata” e “cambiamento climatico” al 93% sulla categoria “Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”, mentre nella configurazione 2 i crediti ambientali riducono gli impatti in percentuali variabili dal 53% sulle categorie “energia incorporata” e “cambiamento climatico” al 91% sulla categoria “Cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo” .

In particolare, i crediti ambientali in entrambi le configurazioni riescono a rendere negativi gli impatti energetico ambientali di ciclo di vita della categoria “cambiamento climatico biogenico”.

7 Conclusioni

La ricerca effettuata ha approfondito la tematica degli edifici ad energia quasi zero, che risulta di particolare interesse per le politiche del “New Green Deal” dell’Unione Europea.

In particolare, sono state esaminate due diverse configurazioni di un edificio ad uso ufficio, che sono state modellizzate e simulate in regime non-stazionario al fine di verificare il raggiungimento del target di nZEB e valutare i corrispondenti impatti energetici e le emissioni di gas climalteranti di ciclo di vita.

Tali configurazioni sono caratterizzate dalle stesse geometrie e scelte impiantistiche per i sistemi di climatizzazione.

Tuttavia, nella configurazione 1 si è utilizzato un isolante termico convenzionale (XPS) e un sistema di accumulo di energia elettrica, nella configurazione 2 si è invece utilizzato un isolante naturale (fibra di cellulosa) e non è stato previsto l’impiego di sistemi di accumulo.

Dallo studio condotto emerge che la maggior parte dei consumi di energia elettrica in entrambe le configurazioni è dovuta alle apparecchiature elettriche e al VRF, che incidono rispettivamente per il 31% e per il 48% del totale.

I risultati evidenziano altresì un sostanziale bilancio nullo di energia a scala annuale, conseguito computando l’ energia generata in sito e quella consumata nel corso del periodo di analisi.

L’applicazione della metodologia LCA ha consentito di stimare gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita connessi all’unità funzionale nelle due configurazioni citate e di identificare il contributo di ogni fase del ciclo di vita. Dall’analisi è emerso che, in entrambe le configurazioni, il modulo B6 “consumi energetici” è responsabile del maggior contributo all’energia incorporata.

Nella configurazione 1 il modulo B6 è responsabile del maggiore contributo al GWP_b , il modulo A “fase di produzione” ha un impatto maggiore nelle categorie d’impatto GWP e GWP_f mentre il modulo B4 ha un impatto maggiore nella categoria GWP_{LULUC} .

Nella configurazione 2 il modulo B6 è responsabile del maggiore contributo al GWP e al GWP_b , il modulo A ha un impatto maggiore nella categoria d’impatto GWP_f mentre il modulo B4 ha un impatto maggiore nella categoria GWP_{LULUC} .

Dal confronto tra gli impatti energetici e le emissioni di gas climalteranti è emerso che la configurazione 2 ha impatti inferiori in quasi tutte le categorie esaminate, tranne che nel cambiamento climatico biogenico GWP_b . Dall’analisi dei risultati è possibile evidenziare che il sistema di accumulo di energia ha permesso di incrementare il livello di load match di circa il 30% nella configurazione 1, riducendo di 3000 kWh l’import di energia dalla rete.

Con riferimento al solo sistema impiantistico, si osserva una riduzione dell’energia incorporata di ciclo di vita dell’impianto del 2% e la riduzione del GWP , GWP_f e GWP_b di ciclo di vita di circa rispettivamente il 6%, 6% e 15%, mentre si ha un incremento di circa il 4% del GWP_{LULUC} .

Inoltre, si osserva che la prestazione termofisica dei due isolanti è equivalente con specifico riferimento alla fase d’uso. Tuttavia, con riferimento al solo involucro se si estende la prospettiva all’intero ciclo di vita si evidenzia che utilizzando l’isolante in fibra cellulosa si ha una riduzione dell’energia incorporata pari a circa il 27% e una riduzione degli impatti pari a circa il 20% per tutte le categorie d’impatto ambientale, ad eccezione del GWP_{LULUC} in cui le prestazioni peggiorano del 2%.

Tuttavia, a fronte dei ridotti vantaggi ambientali connessi all’utilizzo del sistema di accumulo, occorrerebbe ampliare l’analisi evidenziando anche valutazioni di tipo economico.

Infine, con riferimento al sistema involucro-impianto si osserva che i benefici indotti dall’impiego di un sistema di accumulo (configurazione 1) sulla maggior parte delle categorie di impatto esaminate sono annullati dal maggiore impatto connesso all’impiego dell’isolante in XPS.

Riferimenti bibliografici

- [1] V. , P. Z. A. P. S. L. C. C. P. S. B. N. C. Y. C. L. G. M. I. G. M. H. K. L. E. L. J. B. R. M. T. K. M. T. W. O. Y. R. Y. and B. Z. Masson-Delmotte, "IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," 2021.
- [2] European Commission, "COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS." 2019.
- [3] European Commission, "REGOLAMENTO (UE) 2021/1119 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 30 giugno 2021." 2021.
- [4] European Commission, "COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI - Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa: inverdire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita," 2020.
- [5] "Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici." 2015.
- [6] "Impianti aerulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura." 1995.
- [7] "UNI 10349-1:2016: Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata." 2016.
- [8] P. Torcellini *et al.*, "A COMMON DEFINITION FOR ZERO ENERGY BUILDINGS," 2015.
- [9] J. E. Salom, A. Marszal, and J. Widén, "Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with high-resolution data SABINA: SmArt BI-directional multi eNergy gAteway View project Development and evaluation of forecasting models for solar power and electricity use over space and time View project," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/271135453>
- [10] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo, and M. Mistretta, "Different energy balances for the redesign of nearly net zero energy buildings: An Italian case study," 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.048.
- [11] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo, and M. Mistretta, "Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study," *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 371–381, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.12.046.
- [12] "UNI EN ISO 14040:2021: Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento." 2021.
- [13] "UNI EN ISO 14044:2021: Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida." 2021.
- [14] "UNI EN 15978:2011: Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo." 2011.
- [15] "UNI EN 15804:2021: Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto," 2021.
- [16] Rolf Frischknecht *et al.*, "Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3 , v2.0 Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf," 2007.
- [17] V. Castellani *et al.*, *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods : new methods and differences with ILCD.* 2018.
- [18] B. C. S. B. R. J. M.-R. E. W. B. Wernet G, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology." 2016.
- [19] M. A. Cusenza, S. Bobba, F. Ardente, M. Cellura, and F. di Persio, "Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles," *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, pp. 634–649, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.056.

- [20] “Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC,OJ L 266.” 2006.
- [21] “Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).” 2012.
- [22] “Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) PHOTOVOLTAIC MODULES USED IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION,” 2019.
- [23] I. PVPS Task, *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems 2020 Task 12 PV Sustainability*. 2020. [Online]. Available: www.iea-pvps.org