



# CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca  
sull'Inquinamento e sull'Ambiente - "Mauro Felli"

A.D. 1308

unipg

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA

# XXI congresso nazionale.

Sviluppo sostenibile,  
tutela dell'ambiente  
e della salute umana.

“ **Perugia**  
**8-9 aprile**  
**2021** ”

**MAURO FELLI**

**CIRIAF** - Centro Interuniversitario di Ricerca sull’Inquinamento e sull’Ambiente - “Mauro Felli”  
Università degli Studi di Perugia

**XXI CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF** - Sviluppo Sostenibile, Tutela dell’Ambiente e della Salute Umana -  
Atti  
Perugia, 8 e 9 aprile 2021, Università degli Studi di Perugia

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2021.  
ISBN 978-88-9392-279-1 (online)

Impaginazione e progetto grafico di copertina:  
Roberto Fiorella (CIRIAF - Università degli Studi di Perugia)

 L’edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su [www.morlacchilibri.com](http://www.morlacchilibri.com).  
La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>). La licenza permette di condividere l’opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.  
© 2021 Morlacchi Editore University Press

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia

[www.morlacchilibri.com](http://www.morlacchilibri.com)

## **Temi Congressuali**

- 1) Energie rinnovabili e impianti sostenibili
- 2) Sostenibilità ambientale ed economico-sociale
- 3) Edilizia sostenibile e bioarchitettura
- 4) Pianificazione strategica

## **Sessioni Strutturate Progetti**

S11 - Progetto BRIC INAIL

S12 - Progetto PRIN Biocheaper

S13 - Progetto PRIN Next.com

## **Comitato Organizzatore**

Franco Cotana - Presidente

Francesco Asdrubali - Vice Presidente

Pietro Buzzini

Federico Rossi

Elisa Moretti

Mirko Filipponi

Andrea Presciutti

Marco Barbanera

Giorgio Baldinelli

Paolina Cerlini

Elisa Belloni

Cinzia Buratti

Andrea Nicolini

Benedetta Turchetti

Beatrice Castellani

Gianluca Cavalaglio

Anna Laura Pisello

Valentina Coccia

Michele Goretti

Luca Fondacci

## **Segreteria Organizzativa**

Vanda Baldelli

Ilaria Castellini

Roberto Fiorella

Serena Gallicchio

Leandro Lunghi

Fabio Meattelli

Maria Angela Polverini

## Indice

<b>Introduzione</b> .....	p. V
<b>IP holds the instruments that COP-26 can use to successfully address global biodiversity loss. ...</b>	p. 1
<i>Andrea Alunni, Lilian Eunice Volcan</i>	
<b>Architetture e contemporaneità. Il caso del Palazzetto dello Sport di Bastia Umbra. ....</b>	p. 23
<i>Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Michela Meschini, Filippo Cornacchini</i>	
<b>Il disegno della riforestazione.</b>	
<b>Processi di rigenerazione dell'area dell'ex centrale Enel di Pietrafitta. ....</b>	p. 37
<i>Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Simona Ceccaroni, Marco Seccaroni</i>	
<b>Studio della biomassa legnosa a livello regionale e proposte per un possibile sviluppo sostenibile nel medio termine. ....</b>	p. 45
<i>Alessandro Petrozzi, Andrea Nicolini, Gianluca Cavalaglio, Valentina Coccia, Franco Cotana</i>	
<b>Pannelli "decompensati". Studio e caratterizzazione di pannelli igroscopici in legno per applicazioni nella regolazione passiva dell'umidità indoor. ....</b>	p. 61
<i>Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia</i>	
<b>Analysis of AC/DC power converters for electrical vehicles. ....</b>	p. 70
<i>A. Hassan Shehata, E. Belloni, A. Faba, S. Quondam Antonio, E. Cardelli</i>	
<b>A new model for estimating the Solar Heat Gain Coefficient of an Aerogel glazing system. ....</b>	p. 86
<i>Piergiovanni Domenighini, Elisa Belloni, Cinzia Buratti</i>	
<b>A CFD model for a real scale ventilated brick wall: validation and dynamic simulations of the energy performance. ....</b>	p. 98
<i>Costanza Vittoria Fiorini, Francesca Merli, Domenico Palladino, Cinzia Buratti</i>	
<b>Noise pollution and mental health: a narrative review. ....</b>	p. 117
<i>Giulia Menculini, Patrizia Moretti, Luigi Attademo, Pierfrancesco Maria Balducci, Francesco Bernardini, Alfonso Tortorella</i>	
<b>Rumore di fondo nelle aule scolastiche e apprendimento degli studenti della scuola primaria. ....</b>	p. 131
<i>Chiara Visentin, Matteo Pellegatti, Nicola Prodi</i>	

- A comparative study on opto-thermal properties of natural clay bricks incorporating dredged sediments.** ..... p. 146  
*Mattia Manni, Alessandro Petrozzi, Andrea Nicolini, Marco Barbanera, Leandro Lunghi, Valentina Coccia, Giuseppino Vento*
- Influenza delle scelte degli operatori sulla certificazione di sostenibilità ambientale di un edificio: un'esperienza di Round Robin Test.** ..... p. 164  
*Francesco Asdrubali, Claudia Guattari, Marta Roncone, Giorgio Baldinelli, Eid Gul, Cristina Piselli, Anna Laura Pisello, Andrea Presciutti, Fabio Bisegna, Laura Pompei*
- How does the substrate material affect the optic performance of retro-reflective coatings? An experimental investigation.** ..... p. 189  
*Alessia Di Giuseppe, Marta Cardinali, Beatrice Castellani, Mirko Filipponi, Andrea Nicolini, Federico Rossi*
- An innovative high-reflective mulching membrane coupled with a sub-irrigation system for a sustainable development of food crops.** ..... p. 200  
*Alessia Di Giuseppe, Mattina Manni, Alessandro Petrozzi, Laura Maria Becchetti, Andrea Nicolini, Federico Rossi, Franco Cotana*
- Hydrothermal carbonization of citrus peel waste and the effects of temperature on hydrochar properties during process water recirculation.** ..... p. 211  
*Antonio Picone, Maurizio Volpe, Fabio Codignole Luz, Antonio Messineo*
- Preliminary LCA of a polygeneration plant fed with lignocellulosic biomass.** ..... p. 224  
*Ramoon Barros Lovate Temporim, Gianluca Cavalaglio, Alessandro Petrozzi, Andrea Nicolini, Franco Cotana*
- Lessons learned from the operation of a small-scale open-top gasifier with forestry residues.** p. 234  
*Rohit Borooh, Eleonora Cordioli, Daniele Basso, Daniele Antolini, Francesco Patuzzi, Marco Baratieri*
- Analisi di inventario di un sistema di valorizzazione energetica di biomasse residuali di origine forestale in un'ottica di ciclo di vita.** ..... p. 245  
*Maria Anna Cusenza, Sonia Longo, Daniele Antolini, Marco Baratieri, Daniele Basso, Rohit Borooh, Maurizio Cellura, Francesco Guarino, Domenico Panno, Francesco Patuzzi*
- The role of the citizen in sustainability: the Sustainable Energy and Climate Action Plan for the municipality of Assisi.** ..... p. 256  
*Ettore Stamponi, Marta Cardinali, Luca Fondacci, Elisa Moretti, Franco Cotana, Stefania Proietti, Bruno M. Broccolo, Paolo Sdringola, Federica Lunghi, Patrizia Fortini*

**Controllo Attivo del Rumore all'Interno della Cabina di un Trattore:****Test Preliminari in Camera Semi-Anecoica. ....** p. 268*Francesco Mori, Paolo Bonfiglio, Patrizio Fausti, Francesco Pompoli,  
Andrea Santoni, Pietro Nataletti***Stato dell'Arte del Controllo Attivo del Rumore applicato ai Mezzi di Trasporto. ....** p. 279*Francesco Mori, Paolo Bonfiglio, Patrizio Fausti, Francesco Pompoli, Andrea Santoni***ANCHOR LIFE PROJECT: un sistema integrato di gestione del rumore portuale. ....** p. 298*Giuseppe Marsico, Giorgio Baldinelli, Riccardo Gabriele Di Meglio, Jaime Bustillo Galvez,  
Konstadinos Konstadakopoulos, Simona Repetto***The NEXT.ROOM:****a novel test room specifically designed for deepening our knowledge on human comfort. ....** p. 304*Ilaria Pigliautile, Vittori Filippo, Anna Laura Pisello***Prototipo del sedile a controllo attivo delle vibrazioni: storia delle prove sperimentali. ....** p. 319*Antonio Moschetto, Lindoro Del Duca, Pietro Nataletti, Annalisa Fregolent***Application of physiological measurements for thermal comfort assessment. ....** p. 328*Silvia Angela Mansi, Camillo Porcaro, Ilaria Pigliautile, Anna Laura Pisello, Marco Arnesano***Governance e resilienza in territori fragili.****Analisi degli impatti socio-economici e ambientali derivanti dall'impiego****delle biomasse da manutenzione boschiva nell'area del Sud-Ovest Orvietano. ....** p. 336*Luca Fondacci, Andrea Nicolini, Franco Cotana, Mattia Manni, Leandro Lunghi***Ricerca e catalogazione delle tipologie di danno extra-uditivo da esposizione al rumore. ....** p. 351*Giulio Arcangeli, Sergio Luzzi, Raffaele Mariconte, Nicola Mucci,  
Paola Pulella, Veronica Traversini***Scelta e catalogazione degli scenari di indagine e indicazioni operative****per l'analisi acustica degli ambienti scolastici possibili sedi di danno extra-uditivo****da esposizione al rumore. ....** p. 363*Francesco Asdrubali, Sergio Luzzi, Lucia Busa, Franco Cotana, Michele Goretti,  
Claudia Guattari, Raffaele Mariconte***Resilient territories. The case of post-earthquake reconstruction in Emilia Romagna. ....** p. 374*Francesco Alberti*

<b>La Strategia nazionale per le aree interne: lo stato dell'arte.</b> .....	p. 383
<i>Cristiana Corritoro</i>	
<b>Apprendimento in età evolutiva e tecnologie di supporto ai tempi dell'emergenza COVID nell'area dell'Alto Chiascio.</b> .....	p. 388
<i>Paola Tomassoli</i>	
<b>La dimensione territoriale del potere. Riflessioni sui principi costituzionali utili alla governance ottimale delle "aree interne".</b> .....	p. 394
<i>Carlo Calvieri</i>	
<b>Assessing the impact of thermal comfort models based on physiological parameters of human body on the calculation of heating and cooling demands of indoor spaces.</b> .....	p. 402
<i>G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G.F. Giuzio, A. Palombo, G. Russo</i>	
<b>L'evoluzione della disciplina normativa in materia di produzione di energia idroelettrica da corsi d'acqua superficiali.</b> .....	p. 415
<i>Alessandro Formica</i>	
<b>La consapevolezza e la sensibilizzazione degli occupanti come strumento per l'efficienza energetica, la sostenibilità ambientale e il comfort: il caso di studio ARPA UMBRIA.</b> .....	p. 431
<i>Maria Giulia Proietti, Elisa Moretti, Anna Laura Pisello, Andrea Nicolini, Agnese Corneli, Luca Proietti</i>	
<b>A list of dos and don'ts in view of the next earthquake in Italy.</b> .....	p. 447
<i>Gastone Ave</i>	
<b>Valutazione dello Smart Readiness Indicator nel settore residenziale: primi risultati su edifici rappresentativi del parco edilizio italiano.</b> .....	p. 464
<i>Marianna De Monaco, Laura Canale, Giorgio Ficco, Andrea Frattolillo, Marco Dell' Isola, Biagio Di Pietra, Giovanni Puglisi, Ilaria Bertini</i>	
<b>La Strategia nazionale per le aree interne: lo stato dell'arte.</b> .....	p. 483
<i>Francesco Monaco</i>	

# XXI Congresso Nazionale CIRIAF

*Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana*

## Introduzione

Il Congresso Nazionale CIRIAF 2021 “SVILUPPO SOSTENIBILE, TUTELA DELL’AMBIENTE E DELLA SALUTE UMANA”, giunto alla XXI edizione, si è tenuto in modalità telematica sulla piattaforma Teams nei giorni 8 e 9 aprile 2021.

Il perdurare dell'emergenza sanitaria dovuta al COVID-19 ha fatto sì che, dopo l'edizione del 2020 in pieno lockdown (16 e 17 aprile 2020), per il secondo anno consecutivo il Congresso sia stato un evento online.

Il CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente “Mauro Felli”), a cui afferiscono oltre 100 docenti universitari di 14 diversi Atenei, promuove da anni attività di ricerca interdisciplinare sui temi dell'inquinamento ambientale, dello sviluppo sostenibile, delle fonti energetiche rinnovabili e alternative, della pianificazione energetica, della mobilità sostenibile, degli effetti sanitari e socio-economici dell'inquinamento ambientale.

Il Congresso Nazionale CIRIAF 2021, giunto alla ventunesima edizione e diventato nel tempo un importante appuntamento per studiosi ed esperti non solo del mondo della ricerca, è stato caratterizzato da alcune Sessioni orali sui temi tipici del Congresso, ed in particolare:

- Sostenibilità ambientale ed economico-sociale;
- Edilizia sostenibile e bioarchitettura;
- Energie rinnovabili e impianti sostenibili;
- Pianificazione strategica

Sono inoltre state organizzate due sessioni strutturate focalizzate su altrettanti progetti PRIN 2017 che vedono coinvolti numerosi studiosi afferenti al CIRIAF:

- Progetto PRIN Next.com;
- Progetto PRIN Biocheaper.

Durante il congresso è stata infine organizzata una sessione strutturata per la presentazione dei risultati del progetto BRIC INAIL “Aspetti innovativi connessi alla prevenzione del rischio da rumore e vibrazioni: sviluppo di dispositivi basati sulla tecnologia Active Noise Control e Active Vibration Control per la protezione dei lavoratori e misure anche nell’ottica della prevenzione degli effetti extra-uditivi del rumore”.

Il Congresso ha pertanto rappresentato un'importante occasione per una prima divulgazione dei risultati dei progetti menzionati e per un dibattito tra le varie unità operative.

Sono pervenuti complessivamente 38 lavori, tutti di buona qualità, di cui il presente volume di Atti rappresenta il compendio.

L'appuntamento è per aprile 2022, con l'auspicio di poter fare un Congresso in presenza!

**Il Presidente del Comitato Scientifico**

*Prof. Gino Moncada Lo Giudice*

**Il Presidente del Comitato Organizzatore**

*Prof. Franco Cotana*

**Il Vice Presidente del Comitato Organizzatore**

*Prof. Francesco Asdrubali*

**Il Direttore del CIRIAF**

*Prof. Pietro Buzzini*

## XXI Congresso Nazionale CIRIAF

*Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana*

### **Analisi di inventario di un sistema di valorizzazione energetica di biomasse residuali di origine forestale in un'ottica di ciclo di vita**

**Maria Anna Cusenza<sup>1,\*</sup>, Sonia Longo<sup>1</sup>, Daniele Antolini<sup>2</sup>, Marco Baratieri<sup>2</sup>, Daniele Basso<sup>2</sup>, Rohit Borooah<sup>2</sup>, Maurizio Cellura<sup>1</sup>, Francesco Guarino<sup>1</sup>, Domenico Panno<sup>1</sup>, Francesco Patuzzi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze Ed.9, 90128 Palermo

<sup>2</sup> Facoltà di Scienze e Tecnologie, Libera Università di Bolzano, Piazza Università 1, 39100 Bolzano

\* Autore di riferimento. E-Mail: mariaanna.cusenza@unipa.it

---

**Abstract:** Il presente lavoro descrive i risultati dell'analisi di inventario di un impianto integrato "gassificatore – cogeneratore" impiegato per la valorizzazione energetica di biomasse residuali di origine forestale, in un'ottica di ciclo di vita. Il sistema gassificatore – cogeneratore è un prototipo realizzato presso il laboratorio di Bioenergia e Biocombustibili dell'Università di Bolzano. L'impianto è costituito da un gassificatore down-draft e un cogeneratore con motore diesel dual – fuel e una potenza elettrica di 3 kW. L'analisi di inventario è stata sviluppata in accordo agli standard della serie ISO 14040. L'unità funzionale (UF) è 1 kWh di energia elettrica immessa in rete. I confini del sistema sono stati definiti secondo un approccio "gate to gate" e hanno incluso le fasi di gassificazione della biomassa, di purificazione del syngas e il processo di produzione di energia elettrica e termica nel cogeneratore. Il risultato dello studio è il bilancio ambientale, riferito all'UF, espresso in termini di flussi energetici e di massa in ingresso al sistema e di flussi in uscita in termini di prodotti, co-prodotti e rifiuti. Il bilancio ambientale dei processi di foreground è corredato dei dataset selezionati per la modellizzazione dell'inventario di ciclo di vita dei processi di background relativi all'energia e ai materiali utilizzati nel sistema in esame. L'analisi si inserisce in uno studio più ampio sviluppato nell'ambito del PRIN 2017: "BIOmasses Circular Holistic Economy APproach to EneRgy equipments (BIO-CHEAPER)" che ha tra gli obiettivi quello di valutare gli impatti energetico-ambientali connessi alla valorizzazione energetica di diverse tipologie di biomasse residuali.

**Keywords:** Gassificazione, Biomasse residuali, Syngas, Economia circolare, Life Cycle Inventory, Sostenibilità ambientale.

## 1. Introduzione

La conversione delle biomasse residuali in combustibili è una strategia che contribuisce al conseguimento di diversi obiettivi in tema di sviluppo sostenibile fissati nell'ambito del Green Deal europeo [1] ed è in linea con i principi dell'economia circolare e della bio-economia perché converte i rifiuti organici in prodotti di valore che possono essere nuovamente reintrodotti nel ciclo economico [2,3]. Inoltre, rappresenta una strategia di gestione dei rifiuti biodegradabili coerente con la gerarchia stabilita dalla normativa della comunità europea in base alla quale il ricorso allo smaltimento in discarica o all'incenerimento con scarso recupero di energia deve costituire l'ultima scelta tra le diverse opzioni di trattamento disponibili [4,5].

I processi di conversione della biomassa in combustibili possono essere raggruppati in due macrocategorie: processi biochimici, quali ad esempio digestione anaerobica e fermentazione, e termochimici, quali ad esempio pirolisi e gassificazione. La scelta del tipo di processo viene effettuata in funzione delle caratteristiche della biomassa, in particolare del contenuto di umidità e del rapporto Carbonio/Azoto (C/N).

Tra i trattamenti termochimici, il processo di gassificazione converte il materiale organico in un prodotto gassoso, syngas, e in uno solido, char. Il syngas può essere utilizzato per la produzione di energia elettrica in motori a combustione interna o per la produzione di biocarburanti di seconda generazione. Il char comprende la frazione organica non convertita e il materiale inerte presente nella biomassa trattata.

L'integrazione di impianti di gassificazione di biomasse residuali con i motori a combustione interna può costituire un sistema in linea con i principi dell'economia circolare, efficiente e pulito per la generazione di energia elettrica e termica. Tuttavia, la penetrazione di questa tipologia di impianti nel mercato dipende da una serie di fattori, quali la competitività in termini economici e di impatto energetico – ambientale con le altre tecnologie di produzione di energia da fonte rinnovabile e da altri fattori socio-economici come la sicurezza dell'approvvigionamento e la riduzione della dipendenza energetica [6].

Con riferimento alla valutazione delle prestazioni ambientali, la Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia ampiamente consolidata e standardizzata a livello internazionale per la valutazione degli impatti energetico – ambientali di prodotti e servizi lungo l'intero ciclo di vita [7,8]. L'impiego di studi LCA durante la fase di sviluppo di una nuova tecnologia può costituire un valido supporto per la progettazione sostenibile di questi sistemi energetici [9].

In questo contesto, lo studio si propone di elaborare l'inventario di un impianto integrato "gassificatore – cogeneratore" impiegato per la valorizzazione energetica di biomasse residuali di origine forestale, seguendo un approccio di ciclo di vita.

L'inventario di ciclo di vita costituisce il risultato intermedio di una ricerca volta a integrare la metodologia LCA nell'eco-design e nella gestione dei sistemi di valorizzazione energetica delle biomasse residuali a scala industriale.

L'articolo si sviluppa in tre sezioni. Nella sezione 2 sono descritte le fasi in cui si articola uno studio LCA, con particolare riferimento alla fase di analisi di inventario. La sezione 3 descrive i principali aspetti

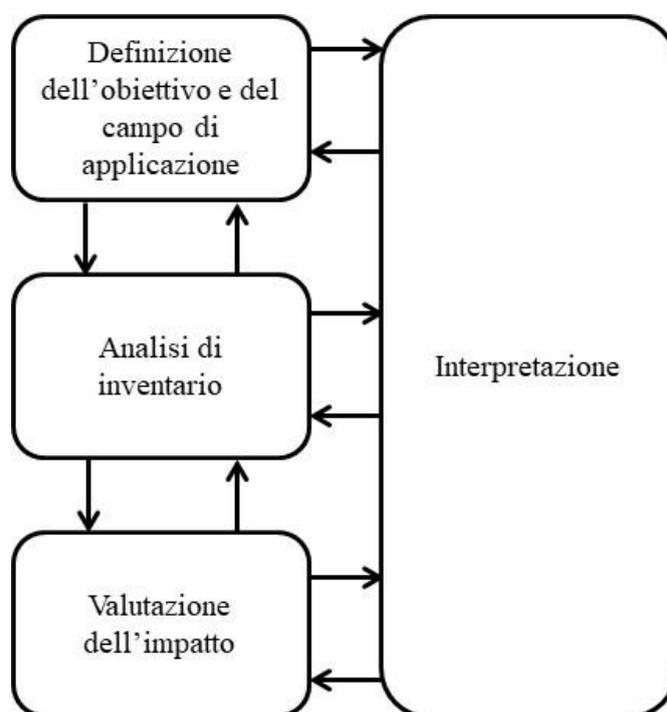
del sistema di prodotto in esame e l'applicazione della metodologia LCA per la definizione dell'inventario. I risultati ottenuti sono illustrati nella Sezione 4. La Sezione 5 fornisce alcune osservazioni finali e delinea gli sviluppi futuri della ricerca presentata.

## 2. Metodo

Uno studio di LCA si articola nelle quattro fasi illustrate in Figura 1 e di seguito elencate e descritte [7,8]:

1. definizione degli obiettivi e del campo di applicazione (goal and scope definition). In questa fase sono esplicitate le finalità dello studio e sono definiti gli aspetti metodologici necessari allo svolgimento dell'analisi;
2. analisi di inventario (life cycle inventory, - LCI). In questa fase si ricostruisce il flusso dell'energia e dei materiali in ingresso e in uscita dal sistema in esame, inclusi tutti i processi di trasformazione e trasporto, e si redige il bilancio ambientale del sistema di prodotto, espresso in termini di consumo di materie prime, emissioni in aria, acqua e suolo (flussi elementari);
3. valutazione dell'impatto (life cycle impact assessment, - LCIA). In questa fase si effettua la valutazione dell'impatto ambientale provocato dai flussi elementari quantificati nella fase di analisi di inventario;
4. interpretazione dei risultati (life cycle interpretation): è la parte conclusiva dell'analisi in cui i risultati ottenuti nell'analisi di inventario e nella valutazione d'impatto sono analizzati al fine di verificare l'affidabilità dello studio e di trarre conclusioni e raccomandazioni finalizzate al miglioramento delle prestazioni ambientali del sistema in esame.

**Figura 1.** Fasi di uno studio LCA (elaborazione propria dallo standard ISO 14040 [7]).



L'analisi di inventario si sviluppa attraverso le fasi di raccolta dati e definizione dei procedimenti di calcolo necessari per la contabilizzazione dei flussi in ingresso e in uscita dalle unità di processo incluse nell'analisi.

I dati raccolti si possono distinguere in:

- dati primari, ossia dati specifici del processo provenienti da rilevamenti diretti. In genere i dati primari sono utilizzati per la modellizzazione dei processi di foreground, ossia i processi principali del sistema di prodotto in esame per i quali sono disponibili dati specifici.
- dati secondari, ossia dati medi provenienti da database ambientali. I dati secondari sono in genere utilizzati per la modellizzazione dei processi di background, ossia i processi per i quali non è possibile un accesso diretto alle informazioni specifiche da chi produce il bene/servizio.

La modellizzazione del sistema di prodotto in esame avviene attraverso la combinazione dei dati primari e dei dati secondari.

### **3. Applicazione della metodologia al sistema in esame**

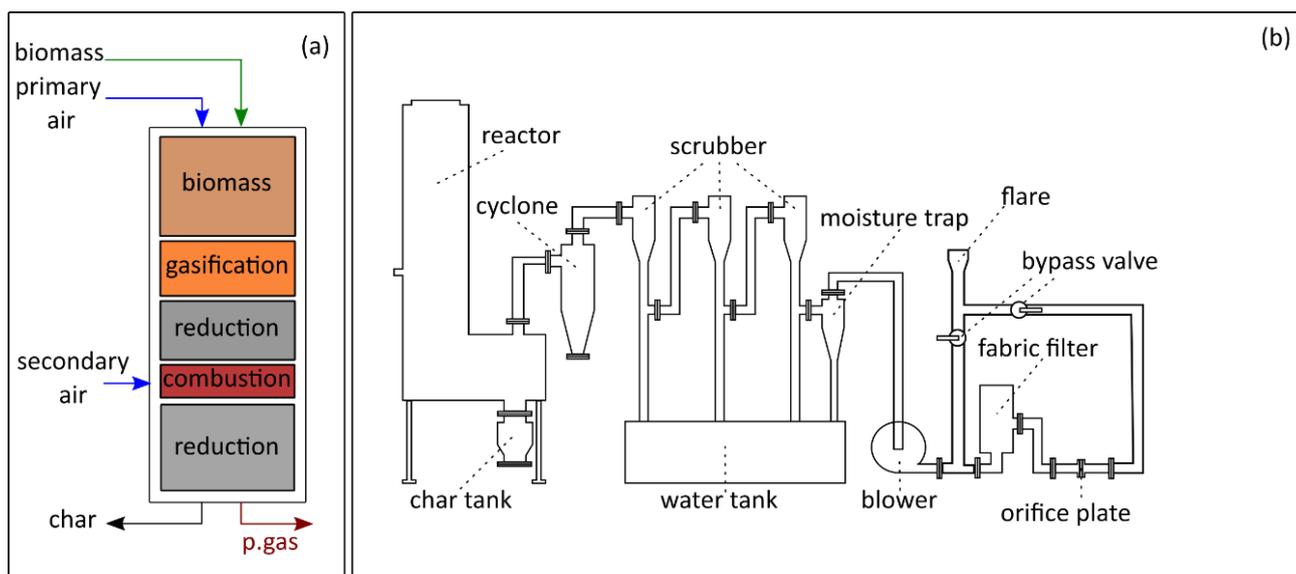
#### *3.1. Descrizione del sistema energetico*

Il sistema gassificatore – cogeneratore è un prototipo realizzato presso il laboratorio di Bioenergia e Biocombustibili dell'Università di Bolzano [10]. L'impianto è costituito da un gassificatore open top down-draft a doppio stadio e un cogeneratore con motore diesel dual – fuel e una potenza elettrica di 3 kW.

Il gassificatore è costituito da un reattore cilindrico in acciaio inossidabile. La parte superiore del reattore è aperta per consentire l'ingresso della biomassa e dell'aria primaria. Il controllo dei parametri di processo è automatizzato, mentre la biomassa viene caricata manualmente. Nel gassificatore avviene la conversione termochimica dei residui forestali con produzione di syngas e char. Il char si deposita sul fondo del reattore e viene rimosso ad ogni ciclo tramite una coclea. Il syngas in uscita dal reattore attraversa una linea di depurazione, costituita da un ciclone, tre scrubber ad acqua, un dispositivo di rimozione dell'umidità e un filtro a maniche, nella quale vengono rimossi gli idrocarburi condensabili ottenendo così un syngas composto principalmente da metano (CH<sub>4</sub>), monossido di carbonio (CO), idrogeno (H<sub>2</sub>) e diossido di carbonio (CO<sub>2</sub>). Il syngas purificato è utilizzato nell'impianto di cogenerazione per la produzione di energia elettrica e termica.

Nella Figura 2 sono illustrati uno schema del gassificatore e il layout del sistema di gassificazione e della linea di depurazione del syngas.

**Figura 2.** Gassificatore open top down-draft (a); Layout dell’impianto di gassificazione (b) [10].

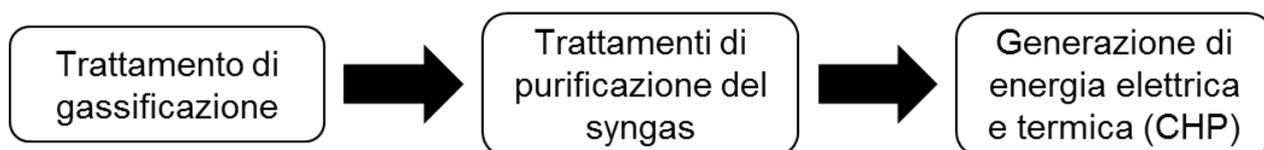


**3.2. Definizione dell’obiettivo e del campo di applicazione**

Lo studio ha l’obiettivo di redigere l’inventario di ciclo di vita della produzione di energia elettrica da un impianto di cogenerazione alimentato con syngas ottenuto dal processo di gassificazione di biomasse residuali di origine forestale.

L’unità funzionale (UF), scelta coerentemente alla funzione principale svolta dal sistema in esame (produrre energia elettrica) e all’obiettivo dello studio, è 1 kWh di energia elettrica immessa in rete. L’analisi segue un approccio “from gate to gate”. I confini del sistema includono le fasi di gassificazione della biomassa, di purificazione del syngas e il processo di produzione di energia elettrica e termica nel cogeneratore (Figura 3).

**Figura 3.** Confini del sistema.



**3.3. Analisi dell’inventario di ciclo di vita (LCI)**

La campagna di raccolta dati è stata effettuata tramite la divulgazione di un questionario al personale che si occupa della gestione operativa dell’impianto [11]. La redazione dell’inventario di ciclo di vita ha previsto due fasi. Nella prima fase sono stati raccolti i dati primari necessari per la modellizzazione dei processi di *foreground*. Nella seconda fase, i dati sono stati elaborati per riferirli

all'UF selezionata (1 kWh di energia elettrica immessa in rete). In seguito, sono stati selezionati i dataset per la modellizzazione dei processi di background. I dati secondari sono stati tratti dal database ambientale Ecoinvent 3.6 [12]. I dataset selezionati sono riferiti al contesto italiano, quando possibile, o a quello europeo.

#### 4. Risultati

Questo paragrafo illustra i risultati della fase di raccolta dati e di elaborazione dei dati primari e i dataset selezionati per la modellizzazione dei processi di background.

##### 4.1. Approvvigionamento della biomassa residuale di origine forestale

Le biomasse forestali impiegate nell'impianto di gassificazione includono:

- rami duri o fragili - ramoscelli di diametro superiore a 5 mm;
- rami flessibili - ramoscelli di diametro inferiore a 5 mm;
- aghi;
- pigne.

Nella Tabella 1 sono sintetizzati i risultati delle analisi di laboratorio eseguite sulle biomasse impiegate.

Le biomasse residue, prima di essere introdotte nel reattore di gassificazione, sono sottoposte ad un pretrattamento di cippatura finalizzato alla riduzione delle dimensioni dei rami e delle altre tipologie di biomassa impiegate. In seguito, le biomasse sono trasportate presso l'impianto.

Gli input relativi al pretrattamento delle biomasse e al loro trasporto presso l'impianto non sono stati quantificati poiché, in accordo agli obiettivi e al campo di applicazione dello studio, queste fasi non sono incluse nei confini del sistema (Figura 3).

**Tabella 1.** Risultati della caratterizzazione delle biomasse residue in esame [10].

<b>Biomassa residuale</b>	<b>C (%w) d.b.</b>	<b>H (%w) d.b.</b>	<b>N (%w) d.b.</b>	<b>S (%w) d.b.</b>
Rami duri o fragili	56,95 ± 0,25	5,88 ± 0,08	0,40 ± 0,03	0,14 ± 0,01
Rami flessibili	66,10 ± 0,35	5,55 ± 0,24	0,89 ± 0,09	0,16 ± 0,02
Aghi	52,36 ± 0,56	6,85 ± 0,08	1,36 ± 0,06	0,30 ± 0,04
Pigne	57,70 ± 0,47	5,96 ± 0,16	1,26 ± 0,08	0,49 ± 0,05
<b>Biomassa residuale</b>	<b>O* (%w) d.b.</b>	<b>Umidità (%w) w.b.</b>	<b>Ceneri (%w) d.b.</b>	<b>PCS** (MJ/kg) d.b.</b>
Rami duri o fragili	33,44 ± 0,32	11,51 ± 0,85	3,19 ± 1,34	19,76 ± 0,21
Rami flessibili	24,79 ± 0,51	21,02 ± 1,60	2,51 ± 0,07	20,46 ± 0,04
Aghi	37,39 ± 0,65	46,07 ± 0,86	1,74 ± 0,23	21,14 ± 0,20
Pigne	33,66 ± 0,50	10,72 ± 2,53	0,93 ± 0,27	20,81 ± 0,09

\*Ottenuto per differenza; \*\*Potere calorifico superiore

## 4.2. Fase operativa dell'impianto

### 4.2.1. Trattamento di gassificazione e purificazione del syngas

Con riferimento al processo di gassificazione, i dati sono stati raccolti con riferimento ad un ciclo di gassificazione (Tabella 2).

**Tabella 2.** Trattamento di gassificazione – dati primari di processo.

Parametro	Valore
Biomassa in ingresso (wb) [kg/h]	2,32
Aria primaria in ingresso [kg/h]	2,47
Aria secondaria in ingresso [kg/h]	1,78
Syngas in uscita (wb) [kg/h]	6,46
Syngas in uscita (db) [kg/h]	5,97
Char in uscita [kg/h]	0,11

La quantità di char prodotto ad ogni ciclo può variare tra il 5 e il 15% della biomassa in ingresso al gassificatore. Nel caso studio in esame, la quantità di char è pari a circa il 5% della biomassa.

Con riferimento alla fase di purificazione del syngas, in questa fase preliminare dell'analisi è stato stimato il solo consumo di acqua negli scrubber, pari a circa 200 litri ogni 2 giorni.

Il char estratto dal reattore e l'acqua in uscita dagli scrubber sono avviati allo smaltimento finale in processi di trattamento per rifiuti speciali non pericolosi.

### 4.2.2. Cogenerazione dell'energia elettrica e termica

I dati relativi alla generazione di energia elettrica e termica sono stati raccolti con riferimento a cicli di cogenerazione di durata pari a 30 minuti. L'impianto di cogenerazione è costituito da un motore a combustione interna diesel dual-fuel. I dati primari raccolti si riferiscono ad una condizione operativa in cui il tasso di sostituzione del diesel (Diesel substitution rate<sup>1</sup>) è pari al 46%. Allo stato attuale di avanzamento della ricerca non sono disponibili dati primari specifici sulle emissioni connesse alla combustione della miscela diesel – syngas nel cogeneratore. Questi dati saranno integrati nell'inventario della fase operativa del sistema energetico in esame una volta conclusa la campagna di misure presso il laboratorio di Bioenergia e Biocombustibili dell'Università di Bolzano.

La Tabella 3 riporta i dati primari raccolti con riferimento al processo di cogenerazione.

<sup>1</sup> Diesel Substitution Rate: tasso di sostituzione del diesel rispetto a un caso di riferimento in cui il cogeneratore è alimentato solo da diesel

**Tabella 3.** Cogenerazione – dati primari di processo.

Parametro	Valore
Syngas in ingresso [g/s]	2
Diesel in ingresso [g/s]	0,17
Olio lubrificante in ingresso [g/kWh]	1
Acqua di raffreddamento [g/s]	138
Potenza erogata in un ciclo [kW]	3
Tensione operativa [V]	230
Corrente erogata [A]	12
Durata del ciclo di cogenerazione [h]	0,5

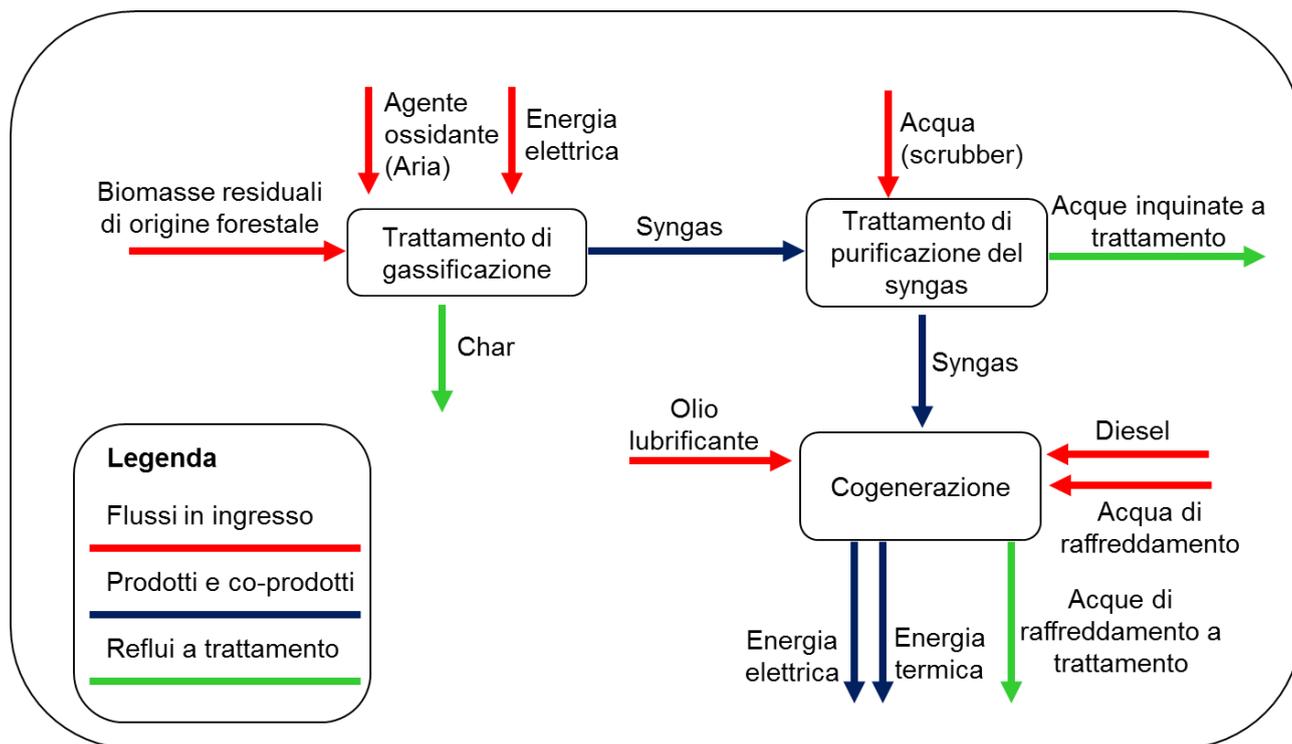
4.3. Elaborazione dati primari e selezione dei dataset

Nella seconda fase dell’analisi di inventario, sulla base delle informazioni ottenute durante la fase di raccolta dati è stato realizzato il diagramma di flusso rappresentativo del sistema energetico in esame e dei flussi in ingresso e in uscita da ogni unità di processo (Figura 4).

I dati primari raccolti sono stati elaborati e riferiti all’UF selezionata. Nella Tabella 4 sono sintetizzati i dati relativi ai flussi in ingresso e in uscita di ogni unità di processo riferiti all’UF.

In seguito, si è proceduto con l’identificazione dei processi di background e la selezione dei dataset più appropriati per la loro modellizzazione (Tabella 5).

**Figura 4.** Diagramma di flusso del sistema energetico in esame.



**Tabella 4.** Dati primari di processo riferiti all'UF – processi di foreground.

Parametro	Quantità
<b>Trattamento di gassificazione</b>	
Biomassa in ingresso [kg]	0,93
Aria primaria in ingresso [kg]	0,99
Aria secondaria in ingresso [kg]	0,72
Energia elettrica in ingresso [kWh]	0,05
Syngas in uscita [kg]	2,60
Char in uscita [kg]	0,04
<b>Trattamento di purificazione del syngas</b>	
Syngas in ingresso [kg]	2,60
Acqua in ingresso [kg]	1,68
Syngas in uscita [kg]	2,40
Acqua in uscita [kg]	1,88
<b>Cogenerazione</b>	
Syngas in ingresso [kg]	2,40
Acqua di raffreddamento in ingresso [kg]	165,60
Olio lubrificante [kg]	0,001
Diesel [kg]	0,20
Acqua di raffreddamento in uscita [kg]	165,60
Energia elettrica (FU) [kWh]	1
Energia termica [kWh]	2

**Tabella 5.** Dataset selezionati per la modellizzazione dei processi di background.

Parametro	Dataset selezionato per la modellizzazione dell'inventario di ciclo di vita – Ecoinvent 3.6 [12]
<b>Trattamento di gassificazione</b>	
Energia elettrica in ingresso	Electricity, low voltage production IT
<b>Trattamento di purificazione del syngas</b>	
Acqua in ingresso	Tap water, production
<b>Cogenerazione</b>	
Acqua di raffreddamento in ingresso	Tap water, production
Olio lubrificante	Lubricant oil, production
Diesel	Diesel burned in cogenerator
Syngas	Natural gas burned in cogenerator

## 5. Conclusioni

Il presente articolo descrive l'analisi di inventario di un sistema gassificatore – cogeneratore alimentato con biomasse residui di origine forestale. L'analisi ha riguardato un impianto a scala di laboratorio ed è basata su dati primari raccolti direttamente in laboratorio.

I risultati dello studio costituiscono una fase preliminare alla redazione dell'inventario di ciclo di vita del sistema in esame, espresso in termini di consumo di materie prime, emissioni in aria, acqua e suolo.

Gli sviluppi futuri della ricerca riguarderanno l'espansione dei confini del sistema con l'obiettivo di includere tutte le fasi della filiera di approvvigionamento della biomassa forestale e i processi di trattamento di fine vita dei reflui di processo, nonché le emissioni di inquinanti durante il processo di combustione della miscela syngas-diesel nel cogeneratore.

L'ultima fase dell'attività di ricerca consisterà nella valutazione degli impatti energetico – ambientali associati al sistema in esame e l'identificazione degli "hot – spot" allo scopo di fornire un supporto all'implementazione di strategie di economia circolare e all'eco-design a scala industriale del sistema in esame.

## Bibliografia

1. 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. The European Green Deal. Bruxelles, 11.12.2019, COM(2019) 640 final; 2019;*
2. European Commission *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on a monitoring framework for the circular economy. COM(2018) 29 final. Strasbourg, 16.1.2018 2018.*
3. 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. A sustainable Bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy; 2018; ISBN 9789279941450.*
4. European Commission *Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Off. J. Eur. Union 2008.*
5. European Union *Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. Official Journal of the European Union. 14.6.2018; 2018;*
6. Beaudin, M.; Zareipour, H.; Schellenberg, A.; Rosehart, W. *Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources. In Energy Storage for Smart Grids: Planning and Operation for Renewable and Variable Energy Resources (VERs); 2014 ISBN 9780124095434.*
7. ISO *ISO 14040: Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework; 2006; Vol. 3; ISBN ISO 14040:2006(E).*
8. ISO *ISO 14044. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines; 2006; ISBN 14044.*
9. Chen, J.; Xu, W.; Zuo, H.; Wu, X.; Jiaqiang, E.; Wang, T.; Zhang, F.; Lu, N. *System development and environmental performance analysis of a solar-driven supercritical water gasification pilot plant for hydrogen production using life cycle assessment approach. Energy Convers. Manag. 2019, 184, 60–73, doi:10.1016/j.enconman.2019.01.041.*
10. Antolini, D.; Brianti, B.; Basso, D.; Borooah, R.; Caligiuri, C.; Patuzzi, F.; Baratieri, M. *Preliminary*

- assessment of forestry residues potential in South Tyrol as viable source for clean energy production through small scale gasification. In Proceedings of the XX Congresso Nazionale C.I.R.I.A.F. Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana. Perugia, 16 - 17 Aprile 2020. ISBN (online) 978-88-9392-190-9; Morlacchi Editore University Press, 2020.
11. Costaiola, A. Sostenibilità ambientale e life cycle assessment di biomasse residuali a fini energetici. Tesi Magistrale - Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare. Università degli Studi di Palermo, 2020.
  12. Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2016**, *21*, 1218–1230, doi:10.1007/s11367-016-1087-8.