ENERGIA

Studio LCA della filiera delle biomasse solide per la produzione di energia elettrica

UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Agenzia per la Coesione Territoriale

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

PON GOVERNANCE E CAPACITÀ ISTITUZIONALE 2014-2020

ENERGIA

Studio LCA della filiera delle biomasse solide per la produzione di energia elettrica

Autori:
Gabriella Fiorentino, Giuliana Ansanelli, Antonietta Cerbone, Alessandro Giocoli, Vincenzo Motola, Amalia Zucaro

Revisione critica:
Flavio Scrucca

ENEA - Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Data di redazione: Gennaio 2023
Data di pubblicazione: Settembre 2025

Sommario

1 Sintesi 8

2 Scopo del documento 10

3 Descrizione della filiera 10

3.1 Prodotti rappresentativi della filiera nazionale 11

3.1.1 La filiera delle biomasse solide in Italia 11

3.1.2 Linee di filiera delle biomasse solide 12

3.1.3 Produzione della materia prima: tipologie di matrici 13

3.1.4 Trasformazione da biomassa a biocombustibile 15

3.1.5 Impianti di produzione di energia da biocombustibile solido 18

3.2 Impatto socio-economico della filiera 21

3.3 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità 24

3.3.1 Certificazioni e normative ambientali legate alla filiera 27

4 Gruppo di lavoro 29

5 Ambito di applicazione dello studio 30

5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento 30

5.2 Confini del sistema 30

5.3 Assunzioni e giudizi di valore 31

5.4 Gestione della multifunzionalità 33

5.5 Revisione critica 34

5.6 Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti 35

5.7 Informazioni ambientali aggiuntive 35

6 Modellazione dei dataset della filiera 36

7 Analisi di inventario 37

7.1 Assunzioni utilizzate nello studio 39

7.2 Descrizione e documentazione processi unitari 40

7.3 Sviluppo dei datasets 48

8 Valutazione degli impatti ambientali 49

8.1 Caratterizzazione 50

8.2 Normalizzazione 54

8.3 Pesatura 58

8.4 Analisi di sensibilità 63
9 Interpretazione dei risultati 65
9.1 Categorie di impatto rilevanti 65
9.2 Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti 65
9.3 Flussi elementari rilevanti 66
10 Conclusioni 66
11 Bibliografia 68
Allegato I: Documentazione a supporto 72
Allegato II: Dati primari dei processi CL1 e CL2 75
Allegato III: Dati secondari utilizzati per lo sviluppo dei dataset 78

Lista delle Figure

Figura 1 Ripartizione per settori dei consumi nazionali di biomassa solida. Fonte: Elaborazione personale adattata da Dati EurObserv'ER 2018 ..... *11*

Figura 2 Catena di eventi filiera Biomasse. Fonte: Elaborazione personale adattata da Sharma et al., 2013 ..... *12*

Figura 3 Struttura generale della linea di filiera bosco-energia. Fonte: Elaborazione personale adattata da Cambero et al., 2014. ..... *13*

Figura 4 Schematizzazione del condizionamento, quale insieme di azioni necessarie per poter trasformare convenientemente le biomasse in biocombustibili. Fonte Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013 ..... *17*

Figura 5 Biomasse dalla raccolta alla trasformazione. Fonte: Elaborazione personale adattata da ENEA, 2005. ..... *18*

Figura 6 Schema del processo di gassificazione. Fonte Elaborazione personale adattata da CNR IIA, 2019. ..... *19*

Figura 7 Schema semplificato di impianto di produzione di elettricità da biomasse solide. Fonte: Elaborazione personale adattata da Dispense Università Sapienza. *20*

Figura 8 Schema a blocchi di un impianto di produzione di energia elettrica a partire da biocombustibile solido ottenuto da RSU (rifiuti solidi urbani). Fonte: Elaborazione personale adattata da Dispense UNINA, 2012. ..... *21*

Figura 9 Tematiche connesse al ruolo attuale e potenziale delle biomasse legnose. Fonte: Elaborazione personale adattata da Fondazione Università Ca' Foscari, 2019. ..... *22*

Figura 10 Distribuzione valore aggiunto lungo la filiera. Fonte: Elaborazione personale adattata da Fondazione Università Ca' Foscari, 2019. ..... *24*

Figura 11 Schema di sintesi dell'approccio "a cascata" nell'impiego di biomasse legnose. Fonte: Elaborazione personale adattata da FIPER, 2015 ..... *25*

Figura 12 Confini del sistema per le biomasse di scarto, dal "dalla culla al cancello" (approccio "zero burden"). *31*

Figura 13 Contributo percentuale di ciascun processo agli impatti (caratterizzati), associati alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia. *51*

Figura 14 Contributo percentuale di ciascun flusso di input/output agli impatti (caratterizzati) del processo CL1 (EE da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU) *52*

Figura 15 Contributo percentuale di ciascun flusso di input/output agli impatti (caratterizzati) del processo CL2 (EE da biomasse da RSU) *53*

Figura 16 Impatti normalizzati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia, con i contributi dei processi CL1 e CL2 ..... *55*

Figura 17 Impatti normalizzati per il processo CL1 (EE da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU) *56*

Figura 18 Impatti normalizzati per il processo CL2 (EE da biomasse da RSU). *57*

Figura 19 Impatti pesati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia, con i contributi dei processi CL1 e CL2 ..... *58*

Figura 20 Impatti pesati per il processo CL1 (EE da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU) *60*

Figura 21 Impatti pesati per la classe CL2 (EE da biomasse da RSU). *62*

Lista delle Tabelle

Tabella 1 Numero e potenza impianti, produzione di energia elettrica da biomasse solide (dati GSE, 2022). 12

Tabella 2 Fonti primarie e secondarie "legnose". Fonte: Elaborazione personale adattata da "regione Marche, 2013".14

Tabella 3 Fonti lignocellulosiche da coltivazioni dedicate Short Rotation Forestry (SRF), potenziali produttivi annuali in tonnellate per ettaro (t/ha) e potere calorifico inferiore (PCI) in GigaJoule (GJ) per tonnellata di sostanza secca (t s.s.). Fonte: Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013. 14

Tabella 4 Fonti lignocellulosiche da coltivazioni erbacee dedicate e relativi potenziali produttivi annuali in tonnellate per ettaro (t/ha) e potere calorifico inferiore (PCI), in GigaJoule (GJ) per tonnellata di sostanza secca (t s.s.). Fonte Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013.....15

Tabella 5 Principali caratteristiche di alcune biomasse residuali dalle lavorazioni industriali (chilogrammo di sostanza secca - kg s.s.). Fonte: Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013.....15

Tabella 6 Unità funzionale e flusso di riferimento dello studio.....30

Tabella 7 Qualità dei dati di foreground del dataset relativo al processo di produzione di elettricità a partire da "altre biomasse" (processo CL1).....33

Tabella 8 Qualità dei dati di foreground del dataset relativo al processo di produzione di elettricità a partire da biomasse da RSU (processo CL2). 33

Tabella 9 Valori di allocazione exergetica per le classi energetiche individuate. 34

Tabella 10 Categorie di biomasse considerate e relativi processi unitari usati nella costruzione del dataset e corrispondente contributo percentuale alla produzione elettrica da biomasse solide in Italia. 36

Tabella 11 Calcoli dei flussi (lordi, netti e di autoconsumo) di energia elettrica (EE) per i processi CL1 e CL2. 39

Tabella 12 Emissioni prodotte dal cogeneratore, durante la produzione di elettricità, classe CL1 42

Tabella 13 Emissioni prodotte dal cogeneratore, durante la produzione di elettricità, classe CL2 42

Tabella 14 Inventari dei processi unitari CL1 e CL2, riferiti alla produzione di 1 kWh elettrico (FU). 43

Tabella 15 Dataset per la produzione di energia da biomasse solide in Italia.....49

Tabella 16 Categorie d'impatto esaminate nel presente studio con le relative unità di misura e abbreviazioni.....50

Tabella 17 Impatti caratterizzati calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia (unità funzionale): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun processo. 51

Tabella 18 Impatti caratterizzati, calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide di provenienza diversa da RSU ("altre biomasse"), in Italia (CL1): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output 53

Tabella 19 Impatti caratterizzati calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide da RSU, in Italia (CL2): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output.....54

Tabella 20 Impatti normalizzati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia. Valori totali e valori per ciascun processo esaminato (CL1 e CL2) 55

Tabella 21 Impatti normalizzati calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide di provenienza diversa da RSU ("altre biomasse"), in Italia (CL1): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output. 56

Tabella 22 Impatti normalizzati calcolati per la produzione, in Italia, di 1 kWh elettrico da biomasse solide da RSU (CL2): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output 57

Tabella 23 Impatti pesati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia. Valori totali e valori per ciascun processo esaminato (CL1 e CL2) 59

Tabella 24 Impatti pesati, calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide di provenienza diversa da RSU ("altre biomasse"), in Italia (CL1): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output 61

Tabella 25 Impatti pesati, calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide da RSU, in Italia (CL2): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output.....62

Tabella 26 Analisi di sensibilità sulle scelte metodologiche - Confronto degli impatti caratterizzati per la produzione di 1kWh di elettricità da biomasse solide in Italia, relativi agli scenari con (with) e senza (w/o) allocazione. 63

Tabella 27 Analisi di sensibilità sui trasporti - Confronto degli impatti caratterizzati per il processo di produzione di 1kWh di elettricità da biomasse solide di provenienza diversa da RSU (CL1) in Italia, relativi agli scenari con (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass) e senza (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass_sensitivity_transport) biomasse di provenienza estera.....64

Lista degli Acronimi

Impact category	Unit	Abbreviation
Climate change	kg CO_2 eq	CC
Ozone depletion	kg CFC11 eq	OD
Ionising radiation	kBq U-235 eq	IR
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	POD
Particulate matter	disease inc.	PM
Human toxicity, non-cancer	CTUh	HTnon-c
Human toxicity, cancer	CTUh	HTc
Acidification	mol H+ eq	AC
Eutrophication, freshwater	kg P eq	EUf
Eutrophication, marine	kg N eq	EUm
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	EUt
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	ECT
Land use	Pt	LU
Water use	m^3 depriv.	WU
Resource use, fossils	MJ	RDf
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	RDm
Climate change - Fossil	kg CO_2 eq	CCf
Climate change - Biogenic	kg CO_2 eq	CCb
Climate change - Land use and LU chan	kg CO_2 eq	CClu
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	HTnon-c-o
Human toxicity, non-cancer - inorganic	CTUh	HTnon-c-i
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	HTnon-c-m
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	HTc-o
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	HTc-i
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	HTc-m
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	ECT-o
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	ECT-i
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	ECT-m

1 Sintesi

Questo rapporto è stato realizzato nell'ambito del progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA, finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020, e descrive la costruzione del dataset relativo alla filiera di produzione di energia elettrica da biomasse solide, in Italia, da inserire nel dataset del mix elettrico italiano.

Lo studio parte da un'accurata descrizione della filiera, con particolare riguardo alla capacità produttiva, alle matrici più utilizzate, alle modalità di trasformazione in combustibili nonché ai principali processi ed impianti di conversione energetica. Inoltre, sono stati illustrati gli impatti socio-economici ed ambientali più significativi della filiera. In dettaglio, dalla descrizione emerge che le biomasse solide sono una risorsa pulita e rinnovabile di energia, con una buona disponibilità potenziale sul territorio, ma non sono ancora sfruttate nel pieno della loro potenzialità. Di conseguenza, l'Italia è solo quinta, in Europa, per la produzione di energia da biomasse solide (EurObserv'ER, 2020). Per di più, il calore ottenuto in impianti di cogenerazione viene abitualmente disperso, perdendo così circa il 60% dell'energia primaria della biomassa. Secondo il recente report del GSE (GSE, 2022), le biomasse solide più utilizzate (65%) sono quelle di origine industriale (es. scarti della lavorazione del legno) e agro-forestale, ma anche quelle derivanti dai Rifiuti Solidi Urbani (RSU) contribuiscono in misura non trascurabile alla produzione di energia elettrica (35%). Le biomasse, inoltre, possono derivare da fonti primarie (foreste e colture dedicate) o secondarie (residui di lavorazioni agro-industriali, potature ecc.). Un altro elemento di differenziazione fra le biomasse solide è rappresentato dall'insieme dei parametri chimico-fisici (es. potere calorifico, umidità, densità ecc.) che le caratterizzano e che determinano anche il tipo di trattamento e di impianto impiegati per la loro valorizzazione energetica. In generale, la produzione di energia avviene attraverso i processi di conversione termochimica in impianti a cogenerazione che, però, come già detto, spesso dissipano in atmosfera l'energia termica ottenuta (FIPER, 2018). Dal punto di vista socio-economico, le ricadute positive dell'utilizzo di biomasse solide a uso energetico riguardano soprattutto il consolidamento delle filiere locali dedicate all'approvvigionamento di residui forestali e agricoli, altrimenti inutilizzati, favorendo la diffusione dell'innovazione in agricoltura e contrastando lo spopolamento delle zone montane e rurali, attraverso numerose iniziative di promozione della "filiera corta" basata su: (i) la vicinanza geografica tra produttori e consumatori; (ii) la capacità di generare valore aggiunto e profitti su scala locale; (iii) l'equità sociale e un'equilibrata ridistribuzione del valore lungo la filiera; (iv) la sostenibilità ambientale. In particolare, secondo il Decreto Ministeriale (DM) 2 marzo 2010, si considerano da filiera corta le biomasse prodotte entro il raggio di 70 km dall'impianto di produzione dell'energia elettrica. Per quanto riguarda la complessa e controversa filiera di produzione di energia elettrica da RSU, lo sviluppo tecnologico ha permesso ai moderni impianti di termovalorizzazione di diventare impianti Waste to Energy (WTE), più sostenibili rispetto ai vecchi inceneritori, ma sono necessari controlli rigorosi per evitare il loro impatto negativo sulla salute umana e sull'ambiente.

Nel presente studio, è stato applicato un approccio "cradle-to-gate", ovvero un approccio che considera tutti i flussi ed i processi fino alla produzione di energia elettrica da biomasse solide, senza considerare le successive fasi di distribuzione, uso e fine vita. Nei confini del sistema investigato, sono stati inclusi due processi di produzione di energia elettrica da biomasse solide, distinti in base alla natura delle biomasse utilizzate: biomasse solide provenienti dai comparti forestale, agricolo ed agroindustriale ("altre biomasse" - processo CL1) e biomasse da Rifiuti Solidi Urbani (RSU – processo CL2). Dal momento che gli impianti italiani di produzione di energia elettrica, alimentati da altre biomasse, utilizzano biomasse residuali per il 95% (EBS, 2020), nel modello sono state considerate solo tali biomasse e, pertanto, è stato applicato alle biomasse un approccio "zero burden", in accordo con la letteratura di settore. Definita l'unità funzionale come la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide, in Italia, il relativo dataset (1kWh Electricity from solid biomass IT mix)

è stato modellato sui due processi CL1 e CL2: (i) produzione di energia elettrica da altre biomasse solide (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass) e (ii) produzione di energia elettrica dalle biomasse degli RSU (Electricity from solid biomass_CL2_ biomass from MSW), attribuendo a ciascun processo un peso relativo corrispondente al contributo percentuale alla produzione elettrica nazionale da biomasse solide (65% al processo CL1 e 35% al processo CL2), in accordo con i dati aggiornati dal GSE al 2020. In dettaglio, per il processo di conversione delle "altre biomasse" in energia elettrica, il modello ha previsto un pre-trattamento di cippatura (riduzione a scaglie di piccole dimensioni della biomassa originaria) e si è assunto che il 90% di tale biomassa è di provenienza locale (filiera corta), mentre il restante 10% proviene in parte (8%) dall'Europa e in parte (2%) dall'America (USA e Canada) (FIPER, 2015). Per il processo di conversione delle biomasse da RSU in energia elettrica, si è assunto che l'energia da biomassa è pari al 51% dell'energia elettrica totale prodotta dagli impianti di termovalorizzazione, in accordo col D.M. 06/07/2012. La qualità dei dati usati nello studio può ritenersi buona, in quanto i dati relativi al primo dataset (processo CL1) sono dati primari, forniti come medie nazionali dall'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS), mentre per il secondo dataset (processo CL2), sono stati usati dati relativi a 7 impianti di termovalorizzazione, selezionati sul portale di Atlaimpianti, in modo da rappresentare la realtà nazionale. L'unica limitazione dello studio è rappresentata dall'assenza di dati primari relativi all'impiantistica ed al trasporto. Ciononostante, tali flussi sono stati opportunamente modellati a partire da dati secondari in database di settore, considerando comunque dati primari per le emissioni generate dai processi di conversione energetica delle biomasse.
Nel modello sviluppato l'elettricità è stata considerata come unico prodotto. Infatti, dai dati primari raccolti, è emerso che nella maggior parte degli impianti in Italia, viene recuperata soltanto energia elettrica (con relativa perdita di energia termica) e, di conseguenza, il calore generato è stato considerato completamente disperso. Ciò nonostante, attraverso un'allocazione exergetica tra elettricità e calore al netto dell'autoconsumo, è stata effettuata un'analisi di sensibilità valutando la possibilità di co-produrre e recuperare sia elettricità che calore, al fine di adeguare gli impianti alle esigenze energetiche nazionali. Inoltre, con un'analisi di sensibilità focalizzata sulla provenienza esclusivamente locale delle biomasse, è stata confermata l'efficienza di un approvvigionamento nazionale in linea con i criteri che definiscono la filiera corta.
L'analisi del ciclo di vita è stata effettuata mediante l'impiego del software SimaPro v.9.3.0.3 (Pré-Consultants), con il supporto del database EcoInvent 3.7.1 (dataset cut-off) per i dati di background, e del metodo EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019) per la valutazione degli impatti. I risultati ottenuti mostrano che il principale hotspot del processo di produzione di 1 kWh di energia elettrica da biomasse solide, in Italia, è il processo unitario di produzione di elettricità da altre biomasse (CL1), che, da solo, contribuisce agli impatti totali per circa il 70% in media per tutte le categorie d'impatto investigate. Le emissioni locali generate dalla conversione delle biomasse in elettricità risultano essere il flusso maggiormente impattante, con un contributo medio del 48% sulle categorie investigate. A seguire, il trasporto contribuisce con il 26% in media e, infine, l'impiantistica (impianto di cogenerazione) e il pretrattamento di cippatura apportano un impatto medio di circa il 16% e il 9%, rispettivamente.
I risultati per il processo CL2 (elettricità da biomasse derivanti da RSU), invece, evidenziano che il contributo relativo delle infrastrutture diventa predominante (circa 75%), mentre il trasporto (circa 16%) e le emissioni locali generate durante la fase di conversione (circa 8%) contribuiscono agli impatti in misura minore.
La normalizzazione e la pesatura indicano gli impatti maggiori per la categoria Particulate Matter (PM) per il processo CL1, a causa delle emissioni locali della fase di conversione energetica delle biomasse. Per il processo CL2, invece, le categorie Ecotoxicity, freshwater (ECT) e Climate change (CC) risultano essere le categorie con impatti maggiori, a valle rispettivamente della normalizzazione

e della pesatura. Tali impatti sono legati principalmente agli impianti di termovalorizzazione e alle emissioni locali da essi generate.
I risultati di questo studio sono perfettamente in linea con l'orientamento della comunità scientifica internazionale che negli ultimi anni ha sottolineato la necessità di adeguare gli impianti e le tecnologie, al fine di minimizzare le emissioni e di recuperare il calore prodotto per migliorare l'efficienza dei processi di conversione energetica delle biomasse solide.

2 Scopo del documento

Il seguente rapporto è stato realizzato nell'ambito del progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA, finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020, come output dell'Azione 5 "Analisi e raccolta dati per la costituzione della banca dati".
Questo rapporto rientra nella sotto-azione A5.3 "raccolta dati prodotto/servizio lungo il ciclo di vita ed elaborazione dei documenti" e rappresenta lo studio della filiera per la produzione di energia elettrica da biomasse solide in Italia.

3 Descrizione della filiera

Il ruolo delle fonti energetiche rinnovabili nel soddisfacimento della domanda di energia elettrica è un tema entrato nel dibattito politico ed economico internazionale, investendo questioni sia ambientali sia sociali ed economiche. Nel processo di transizione verso un sistema decarbonizzato risulta fondamentale riuscire a garantire sicurezza e continuità delle forniture di energia.
In quest'ottica, le energie da biomasse possono giocare un ruolo di grande importanza. La biomassa è definita come la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (sia sostanze vegetali sia animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani (Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011). L'utilizzo di biomasse a fini energetici riguarda tutti quei materiali organici che possono essere impiegati direttamente come combustibili ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi.
In Italia, negli anni scorsi sono stati registrati contributi crescenti delle bioenergie nei settori Elettrico, Termico e dei Trasporti, grazie alla disponibilità di un gran numero di materie prime e di tecnologie mature e affidabili.
Nel 2020, la potenza complessiva degli impianti italiani di produzione di energia elettrica, alimentati con biomasse solide, biogas e bioliquidi (impianti a bioenergie), era pari a 4106 MW e rappresentava il 7,3% della potenza elettrica complessiva da fonti rinnovabili in Italia. La maggior parte degli impianti (88%) a bioenergie era di piccole dimensioni, con una potenza inferiore a 1 MW (GSE, 2022). Tra le bioenergie, in termini di potenza elettrica, dei 4106 MW complessivi, il 41,1% degli impianti era alimentato da biomasse solide, il 35,3% da biogas (12,1% dalla frazione biodegradabile dei rifiuti e 22,5% dalle altre biomasse solide), ed il restante 23,6% da bioliquidi.
Secondo l'ultimo rapporto statistico sulle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) del GSE (GSE, 2022), nel 2020, l'energia elettrica prodotta da biomasse ammontava a 19.634 GWh; tale valore rappresentava il 16,8% della produzione elettrica totale da fonti rinnovabili. In dettaglio, la produzione del 2020 proveniva per il 41,6% da biogas, per il 34,6% da biomasse solide (12,1% dalla frazione biodegradabile dei rifiuti, 22,5% dalle altre biomasse solide) e per 23,8% da bioliquidi. Il 44,9% dell'energia elettrica era prodotta in impianti di potenza superiore a 10 MW, il 41,6% in quelli di potenza inferiore a 1 MW e il restante 14,5% in impianti appartenenti alla classe intermedia (1–10 MW).

3.1 Prodotti rappresentativi della filiera nazionale

3.1.1 La filiera delle biomasse solide in Italia

Le biomasse solide sono una risorsa pulita e rinnovabile di energia, con una buona disponibilità potenziale sul territorio. Infatti, il nostro Paese possiede un consistente patrimonio forestale che, nel 2018, copriva circa il 36,4% dell'intera superficie nazionale, ma che viene utilizzato solo in parte, con prelievi legnosi che interessano all'incirca il 18-37% degli accrescimenti annui di biomassa contro una media dell'Europa meridionale del 62-67%. Di conseguenza, in Italia, i boschi sono poco curati e quindi più soggetti agli incendi nonché meno efficaci nella fissazione della CO2 e nel contrastare i fenomeni di dissesto idrogeologico (ENEA, 2020).
Secondo l'EurObserv'ER, nel 2021, con un consumo di biomassa solida a fini energetici pari a 8,87 Mtep (milioni di tonnellate di petrolio equivalenti), l'Italia si è collocata al sesto posto in Europa, dopo Germania, Francia, Svezia, Finlandia e Polonia (EurObserv'ER, 2020).
Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, è emerso che dei 4,2 TWh di elettricità generata con biomasse solide, meno della metà (1,2 TWh) sono stati prodotti in impianti di cogenerazione, mentre la restante parte è stata prodotta in impianti senza recupero di calore, sprecando quindi circa il 60% dell'energia primaria della biomassa come calore dissipato nell'atmosfera.
La Figura 1 mostra la ripartizione dei consumi italiani di biomassa solida, nel 2018. Si osserva che la fetta più grossa corrisponde al consumo di biomassa solida per la produzione di calore, pari a 7,4 Mtep, di cui ben 6,9 Mtep in impianti domestici, per riscaldamento invernale. La produzione di elettricità da biomassa solida ammonta a 1,6 Mtep (CNR IIA, 2019).

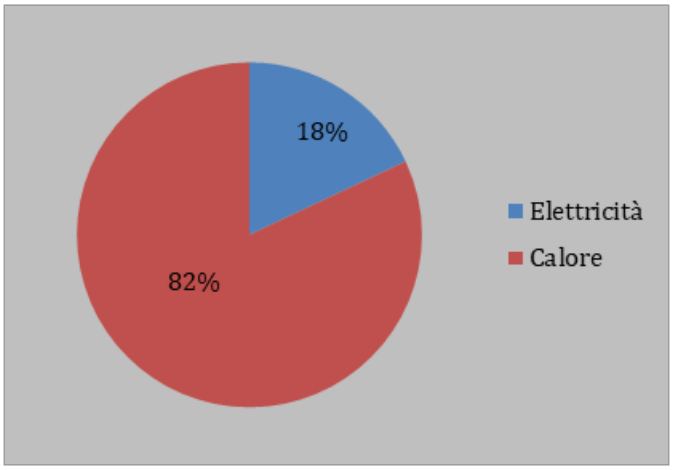


Figura 1 Ripartizione per settori dei consumi nazionali di biomassa solida. Fonte: Elaborazione personale adattata da Dati EurObserv'ER 2018

Solo negli ultimi anni si sta registrando un aumento della produzione di calore in impianti di cogenerazione, grazie ai continui investimenti realizzati nel tempo da parte dei gestori nell'estensione e potenziamento delle reti di teleriscaldamento per allacciare nuove utenze (FIPER, 2018).
Secondo l'ultimo rapporto del GSE, tra il 2019 e il 2020, la produzione di energia da biomasse solide è aumentata di circa il 2,9%, passando da 6609 GWh nel 2019 a 6800 GWh nel 2020 (GSE, 2022). In particolare, dei 6800 GWh prodotti nel 2020, 2379,5 GWh provengono dalle biomasse dei rifiuti solidi urbani (RSU), mentre 4420,5 provengono da altre biomasse (Tabella 1). Questi dati indicano che, pur essendoci un utilizzo significativo delle biomasse da RSU per la produzione elettrica, il principale contributo alla produzione proviene dagli impianti che utilizzano le biomasse provenienti

dal settore agricolo, forestale e agroindustriale che in questo report saranno indicate come “altre biomasse solide”.
Per quanto riguarda il numero di impianti e la relativa potenza, il documento prodotto dal GSE (2022) indica che gli impianti di produzione di energia elettrica da biomasse solide sono 464, con una potenza totale di circa 1688 MW elettrici (Tabella 1).
Per quanto riguarda la situazione regionale, nel 2020 la produzione di energia elettrica da altre biomasse solide (diverse dai rifiuti solidi urbani) si concentra principalmente nel Nord Italia, con contributi al dato nazionale particolarmente elevati in Emilia Romagna (16,6%), Veneto (9,9%), Piemonte (10,4%) e Lombardia (9,2%). Nel Centro Italia, Lazio e Umbria si attestano intorno al 2%, mentre tra le regioni meridionali si distingue la Calabria, che nel 2020 detiene il primato, con una quota del 27,1% sulla produzione elettrica complessiva nazionale (GSE, 2022).

Tabella 1 Numero e potenza impianti, produzione di energia elettrica da biomasse solide (dati GSE, 2022).

BIOMASSE SOLIDE	2019			2020		
	N° impianti	Potenza (MW)	Produzione (GWh)	N° impianti	Potenza (MW)	Produzione (GWh)
Biomassa da Rifiuti solidi urbani (RSU)	60	899.1	2412,2	61	907.3	2379,5
Altre biomasse solide (forestali, agricole, agroindustriali)	410	782.9	4196,7	403	780.9	4420,5

Per quanto riguarda l’energia elettrica prodotta dalle biomasse da RSU, nel 2020, la Lombardia si conferma la regione con la quota percentuale più elevata sulla produzione complessiva nazionale (37,4%), seguita dall’Emilia Romagna (15,8%). Tra le regioni centrali prevale il Lazio (5,7%) e tra quelle meridionali la Campania (14,6%).

3.1.2 Linee di filiera delle biomasse solide

Lo schema generale della filiera delle biomasse solide è descritto in Figura 2 ed include la produzione di biomassa, lo stoccaggio, la trasformazione della materia prima (processi di essiccazione, di densificazione, di cippatura ecc.) e il trasporto agli impianti di conversione energetica (Sharma et al., 2013).

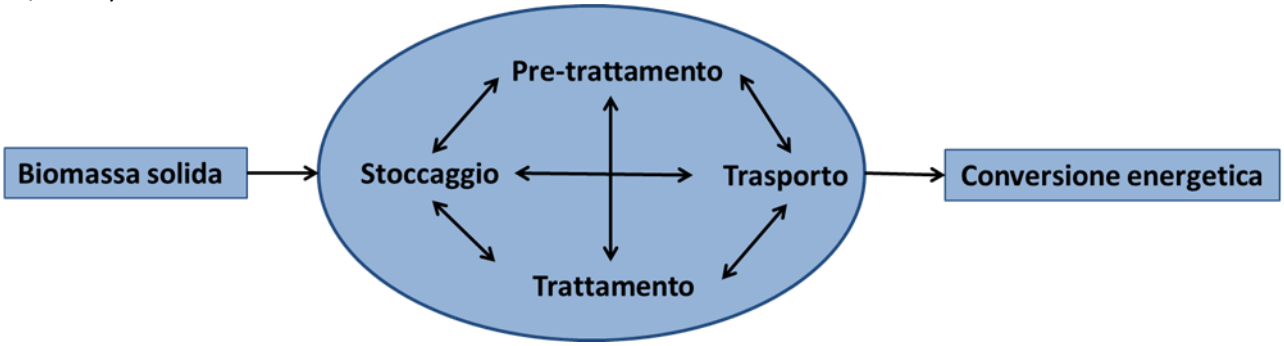


Figura 2 Catena di eventi filiera Biomasse. Fonte: Elaborazione personale adattata da Sharma et al., 2013

I principali comparti di approvvigionamento delle biomasse solide sono:

- comparto forestale e agroforestale: residui delle operazioni selvicolturali o delle attività agroforestali, utilizzazione di boschi cedui, ecc. Da questo comparto deriva la filiera più conosciuta e tradizionale tra le biomasse solide, la cosiddetta "filiera bosco - legno - energia": con questo termine si intende la sequenza di operazioni necessarie alla produzione di energia termica e/o elettrica utilizzando il legname proveniente da alberi prelevati dal bosco (Figura 3) (Cambero et al., 2014).
- Comparto agricolo: residui provenienti dall'attività agricola e colture dedicate.
- Comparto agro-industriale: residui provenienti dalle industrie del legno o dei prodotti in legno, residui dell'industria della carta e residui dell'industria agroalimentare.
- Residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico.
- Rifiuti solidi urbani (RSU): la biomassa utilizzabile a fini energetici è la parte organica dei rifiuti urbani che, dopo una serie di trasformazioni, diventa combustibile solido secondario (CSS), atto a subire i processi di combustione e trasformazione energetica (Makarichi et al., 2018).

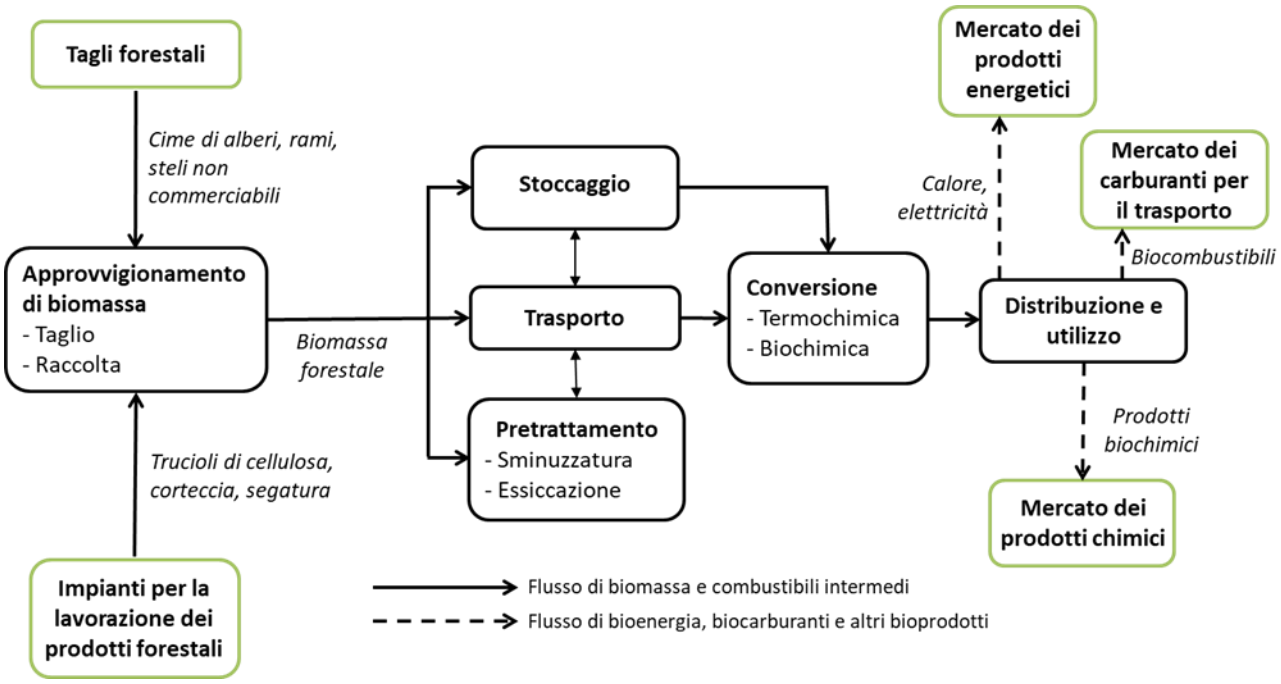


Figura 3 Struttura generale della linea di filiera bosco-energia. Fonte: Elaborazione personale adattata da Cambero et al., 2014.

3.1.3 Produzione della materia prima: tipologie di matrici

La biomassa solida impiegabile a scopi energetici può essere classificata anche a seconda della fonte, in fonti primarie e fonti secondarie. Le fonti primarie sono quelle collegate direttamente all'attività biologica, ossia alla fissazione di energia solare nel processo fotosintetico in un prodotto a struttura più complessa, come il legno.

Le fonti secondarie sono invece quelle residuali, condizionate essenzialmente dall'attività umana. Il loro contributo è particolarmente elevato dove si concentrano l'industria, le prime lavorazioni e le produzioni agroindustriali (Regione Marche, 2013). Fa parte delle biomasse residuali anche la parte organica degli RSU.

Le biomasse solide possono essere riassunte come nella Tabella 2, che mette in relazione le fonti con le categorie di combustibili da esse derivate. Queste biomasse costituiscono le matrici delle rispettive "sotto-filiere" (ad esempio la filiera del legno - arredo o la filiera del cippato).

Tabella 2 Fonti primarie e secondarie "legnose". Fonte: Elaborazione personale adattata da "regione Marche, 2013".

Fonti	**Tipologia**		**Combustibile**
Primarie	**Legnose naturali**	Utilizzazioni boschive commerciali	Allestimenti commerciali, cippato, densificati
		Taglio del bosco ceduo	Allestimenti commerciali, cippato, densificati
		Sfolli e diradamenti	Cippato, densificati
		Ripulitura di fossi e scarpate naturali	Cippato, densificati
	Legnose coltivate	Arboricoltura da legno	Allestimenti commerciali, cippato, densificati
		Arboricoltura lineare e assiepamenti	Allestimenti commerciali, cippato, densificati
		Short Rotation Forestry (SRF)	Cippato, densificati
Secondarie	**Legnose residuali**	Imballaggi legnosi	Cippato, densificati
		Potatura del verde urbano	Cippato, densificati
		Residui della lavorazione del legno	Cippato, densificati
		Potature e espianti di frutteti	Cippato, densificati
		Residui di lavorazioni agroindustriali	Utilizzi tal quale, cippato, densificati

Le risorse naturali provengono da boschi e foreste. Il loro potenziale è enorme, ma l'utilizzo di questo potenziale è ostacolato molto spesso dalle condizioni di marginalità che caratterizzano molti boschi. Normalmente, nel territorio italiano, tutte le aree più accessibili sono già state utilizzate a fini agricoli o urbani. Le foreste che sono rimaste tali devono la loro sopravvivenza ad un'accessibilità limitata, che rende difficoltoso anche un eventuale sfruttamento energetico (Regione Marche, 2013).
Per quanto riguarda le coltivazioni dedicate, le specie più comuni sono i cedui a breve rotazione, meglio noti come Short Rotation Forestry (SRF) (Tabella 3). I vantaggi di queste coltivazioni per la produzione di bioenergia sono: (i) la resa elevata, (ii) l'ottima qualità del cippato per la combustione, (iii) il basso costo della biomassa, (iv) i turni di raccolta molto corti rispetto alle più comuni forme di silvicoltura convenzionale e (v) i ridotti input colturali (lavorazioni del suolo, fertilizzazioni, irrigazioni, trattamenti antiparassitari) rispetto alle colture erbacee (Kauter et al., 2003; Castelli et al., 2016).

Tabella 3 Fonti lignocellulosiche da coltivazioni dedicate Short Rotation Forestry (SRF), potenziali produttivi annuali in tonnellate per ettaro (t/ha) e potere calorifico inferiore (PCI) in GigaJoule (GJ)

per tonnellata di sostanza secca (t s.s.). Fonte: Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013.

Short Rotation Forestry (SRF)	PRODUZIONE STIMATA (t biomassa/ha)	PCI (GJ/t s.s.)
Pioppo	22	20,1
Eucalipto	24	18,6
Robinia	22	17,8
Salice	22	18,7

In Tabella 4 sono, invece, riportate le principali colture dedicate annuali (Zucaro et al., 2019), impiegate per la produzione di energia da biomasse solide.

Tabella 4 Fonti lignocellulosiche da coltivazioni erbacee dedicate e relativi potenziali produttivi annuali in tonnellate per ettaro (t/ha) e potere calorifico inferiore (PCI), in GigaJoule (GJ) per tonnellata di sostanza secca (t s.s.). Fonte Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013.

COLTURE ERBACEE	PRODUZIONE STIMATA (t biomassa/ha)	PCI (GJ/ t s.s.)
Canapa	20	15,9
Sorgo da fibra	93	16,9
Canna comune	62	17,5
Cardo	17	15,6
Miscanto	31	15,9

Infine, in Tabella 5, sono riportate alcune tipologie di biomasse residuali da lavorazioni industriali e le relative caratteristiche.

Tabella 5 Principali caratteristiche di alcune biomasse residuali dalle lavorazioni industriali (chilogrammo di sostanza secca - kg s.s.). Fonte: Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013.

BIOMASSE RESIDUALI DA LAVORAZIONI AGROINDRUSTRIALI	INCIDENZA SUL PRODOTTO PRINCIPALE (% in peso)	PCI (MJ/ kg di s. s.)
Sanse esauste	**22 - 28**	**17,6 – 18,4**
Vinacce esauste	**25 - 30**	**16,5 – 17,4**
Noccioli pesca	**4 - 8**	**16,9 – 17,8**
Gusci noci e nocciole	**50 - 55**	**16,9 – 17,8**

Secondo una stima dell'Ente Nazionale per la Meccanizzazione Agricola (ENAMA, 2011) la disponibilità di residui da colture erbacee è concentrata per il 70% nel Nord Italia, mentre i residui da colture arboree sono localizzati prevalentemente nel Sud Italia.

3.1.4 Trasformazione da biomassa a biocombustibile

I biocombustibili solidi sono caratterizzati da alcuni parametri che ne influenzano le caratteristiche energetiche e quindi condizionano la scelta delle tecnologie da implementare per il loro utilizzo (CNR IIA, 2019). Questi parametri sono:

- potere calorifico superiore (PCS): misura l'energia prodotta dalla combustione completa di una quantità unitaria di combustibile, quando i prodotti della combustione vengono riportati alla temperatura iniziale del combustibile e del comburente;
- potere calorifico inferiore (PCI): si misura in kcal/kg ed esprime la quantità di calore che si sviluppa con la combustione completa di 1 kg di materiale, considerando l'acqua allo stato di vapore a 100°C, cioè la sola quota di calore effettivamente utilizzabile. Il PCI è fortemente influenzato dal contenuto d'acqua della biomassa e diminuisce all'aumentare dell'umidità, non solo perché si riduce la quantità di sostanza secca effettivamente presente per unità di peso, ma anche perché parte dell'energia liberata dalla combustione viene assorbita dal processo di evaporazione;
- umidità relativa: espressa in percentuale di peso su biomassa fresca o secca, l'umidità relativa influisce sui meccanismi di combustione, sulle qualità chimiche del legno e sul peso specifico e varia tra il 25-60% sul tal quale. Ad un contenuto di umidità maggiore corrisponderà un minore potere calorifico per unità di peso, perché durante la combustione solo la sostanza organica produce energia;
- densità: è la massa di biocombustibile nell'unità di volume, espressa in kg/m3. Il cippato ha una densità media di circa 250 kg/m3, mentre nel pellet la densità è di circa 660 kg/m3. Esso rappresenta il più comune indicatore di qualità del materiale poiché il potere calorifico è direttamente proporzionale alla densità;
- dimensione delle particelle: questo parametro è importante per la movimentazione meccanica del combustibile;
- contenuto di ceneri: questo parametro dipende sia dalle caratteristiche del combustibile che dall'efficienza della combustione. Di media, il legno ha un contenuto in ceneri inferiore dell'1-3% rispetto ai materiali erbacei. Nella camera di combustione, le ceneri possono vetrificare e creare residui che aderiscono alle superfici, diminuendo l'efficienza della combustione stessa;
- composizione dei polimeri:
  - contenuto in lignina: varia tra il 20-30% del peso secco e conferisce alto potere calorifico;
  - contenuto in cellulosa: costituisce circa il 50% del peso secco e conferisce alto potere calorifico;
  - contenuto in emicellulosa: varia tra il 10-30% del peso secco ed ha potere calorifico più modesto rispetto ai precedenti due polimeri;
- composizione elementare:
  - contenuto in carbonio (49-51%) e idrogeno (5-7%): alte percentuali conferiscono alto potere calorifico.
  - contenuto in ossigeno (41-45%) e azoto (0,05-0,4%): alte percentuali conferiscono basso potere calorifico.

Per quanto riguarda i biocombustibili solidi da RSU, bisogna aggiungere ulteriori parametri, quali il contenuto di cloro e mercurio (UNI CEN/TS 15359), nell'ottica di una corretta valutazione preventiva dei rischi ambientali connessi alle emissioni dell'impianto che intende utilizzare il combustibile (Ispra, 2010).

Le varie tipologie di biomasse solide necessitano di uno o più interventi per renderle più funzionali all'utilizzo energetico (Figura 4)(Regione Marche, 2013).

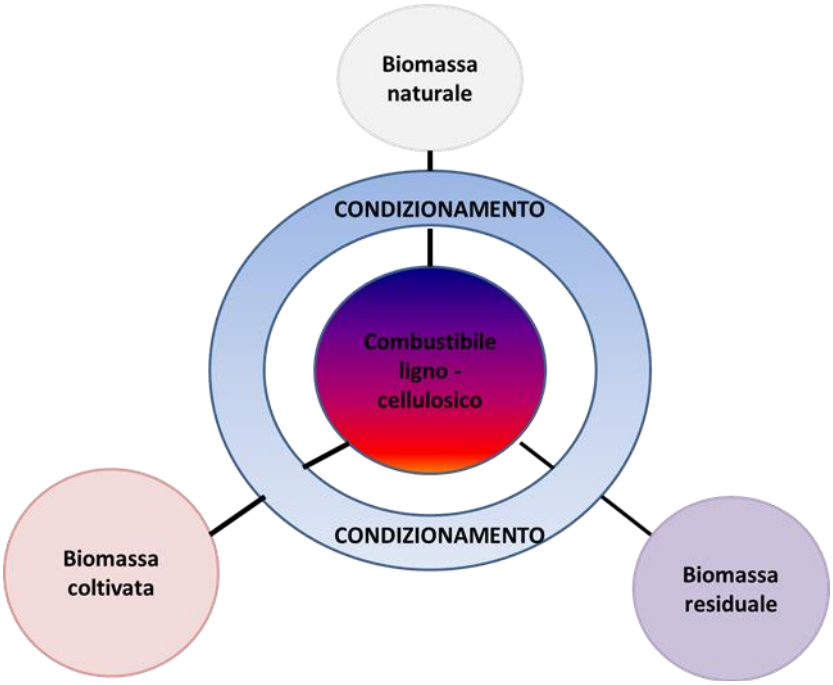


Figura 4 Schematizzazione del condizionamento, quale insieme di azioni necessarie per poter trasformare convenientemente le biomasse in biocombustibili. Fonte Elaborazione personale adattata da Regione Marche,2013.

Le trasformazioni più comuni sono:

- depezzatura (taglio del materiale lungo in sezioni accorciate);
- sminuzzatura (riduzione in frammenti regolari, tramite strumento a coltelli);
- frantumazione (riduzione in frammenti irregolari, tramite strumento a martelli);
- compattazione/imballatura (compressione del materiale sciolto in pacchi più regolari e compatti).

Relativamente alla biomassa solida legnosa, le frazioni più grossolane hanno un utilizzo combustibile diretto mentre per le frazioni più fini (polvere di legno, segature, residui da RSU) si aggiungono processi di compattazione, quali i trattamenti di "densificazione". I pellet sono il prodotto principale della biomassa densificata (Bajwa et al., 2018). Generalmente, i pellet sono facili da bruciare grazie all'ampia superficie e al migliore trasferimento di calore.
Mentre le tecniche per l'uso della biomassa solida legnosa sono ben sviluppate, per la biomassa erbacea le tecniche sono ancora in fase di evoluzione.
La Figura 5 riassume il percorso delle altre biomasse solide (diverse dagli RSU) dalla raccolta alla trasformazione.
I pretrattamenti sono influenzati dal contenuto di umidità, dalla forma e dalla misura della biomassa.
Per diminuire la quantità di umidità, l'industria adotta spesso una essiccazione naturale delle materie prime. In questo caso i tronchi e le ramaglie, a volte precedentemente tagliati in tronchetti, vengono lasciati essiccare direttamente sul luogo di raccolta per la cosiddetta fase di "stagionatura". Il grado di umidità finale dipende dalla durata della stagionatura, dopo il primo anno può arrivare al 55% - 40% mentre dopo due anni può raggiungere una quantità di umidità pari al 25% - 18% (CNR IIA, 2019).
Le colture erbacee perenni invece vengono raccolte al termine della stagione vegetativa quando sono già naturalmente secche, mentre per le altre colture stagionali, come ad esempio sorgo e

panico, si procede a una raccolta in due fasi che consente di ottenere balle con un'umidità compresa tra il 40% e il 35%.
Infine, un'altra tipologia di trattamento è quella dell'essiccazione forzata o attiva, in cui la biomassa viene sottoposta ad una fonte di calore, di solito aria calda. Questa metodologia aumenta però il costo finale della materia combustibile.
I pretrattamenti dei rifiuti solidi urbani sono alquanto diversi e molto più complessi, a causa della eterogeneità della matrice di base; essi infatti prevedono una separazione dei metalli (che vengono riciclati), degli inerti (ad esempio il vetro) e delle frazioni organiche (che vengono inviate agli impianti di compostaggio), lasciando le frazioni con un potere calorifico più elevato per la produzione di CSS (combustibili solidi secondari). Altre soluzioni sono la biostabilizzazione e la bioessiccazione del materiale, precedentemente privato di metalli e inerti, dove la frazione organica viene stabilizzata e perde parte dell'umidità, ottenendo una frazione finale, con un potere calorifico più elevato, adatta alla combustione e composta da carta e cartone, legno, plastica e tessili che possono essere bruciati direttamente. Il prodotto ottenuto durante i trattamenti può essere utilizzato come CSS solo se possiede determinate caratteristiche e in particolare un potere calorifico inferiore di almeno 15 MJ e un'umidità del 25%. Il bioessiccato può essere avviato direttamente alla combustione per il recupero di energia termica ed elettrica (ISPRA, 2010).

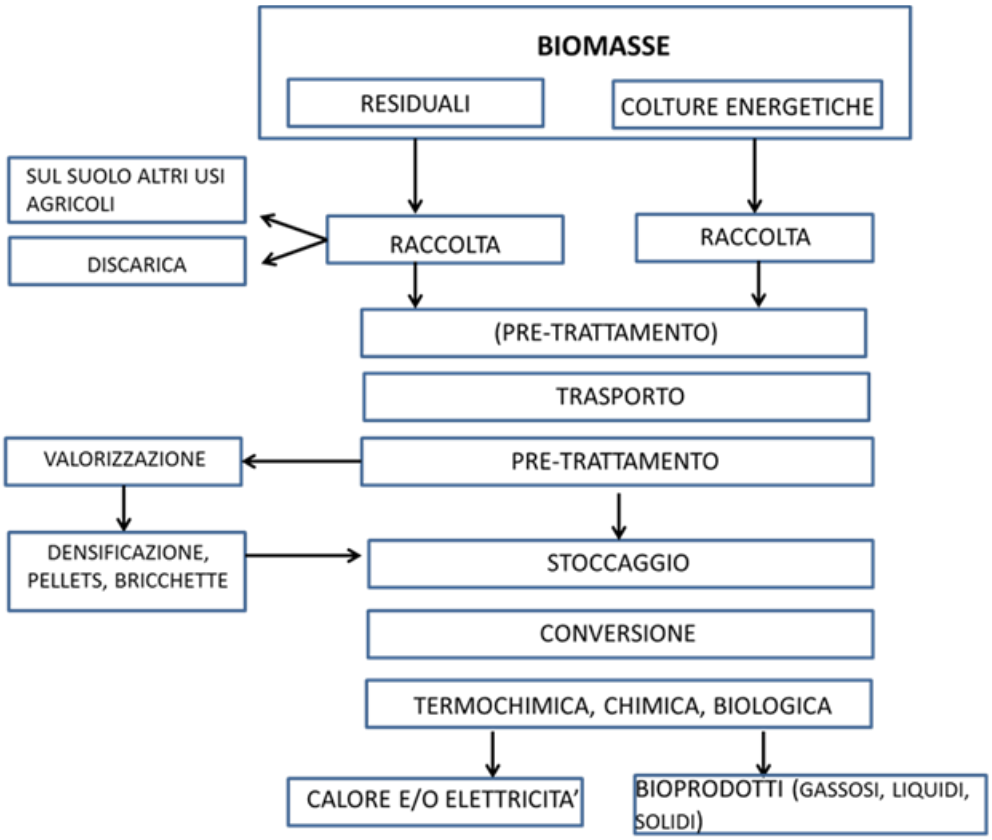


Figura 5 Biomasse dalla raccolta alla trasformazione. Fonte: Elaborazione personale adattata da ENEA, 2005.

3.1.5 Impianti di produzione di energia da biocombustibile solido

L'energia contenuta nei biocombustibili solidi viene liberata attraverso i processi di conversione termochimica.
Le tecnologie di conversione termochimica possono essere così suddivise:

- Combustione diretta: il combustibile viene messo in camera di combustione, subisce inizialmente un'essiccazione, quindi, man mano che la temperatura aumenta si succedono

processi di pirolisi, gassificazione e combustione. Il prodotto finale è il calore che può essere usato per il riscaldamento o impiegato in impianti per la produzione di energia elettrica o per cogenerazione. La combustione diretta avviene in caldaie, i cui principali tipi sono le caldaie a griglia fissa, a griglia mobile, a letto fluido, a polverino e a tamburo rotante. La scelta della tipologia di caldaia dipende anche dal tipo di biomassa che deve essere combusta.

- Gassificazione: è un processo chimico-fisico complesso mediante il quale si trasforma un combustibile solido (legno, scarti agricoli, rifiuti) in un combustibile gassoso. Il processo consiste nell'ossidazione incompleta (a causa dell'assenza o carenza di ossigeno) di una sostanza in ambiente ad elevata temperatura (900-1000°C). Il prodotto risultante è un gas combustibile (detto syngas), caratterizzato da un potere calorifico inferiore variabile (Figura 6), che può essere utilizzato in caldaia o (previo trattamento) in motori endotermici. A seconda della tecnologia impiegata, gli impianti di gassificazione possono essere suddivisi in varie tipologie, tra cui: gassificatori a letto fisso (downdraft e updraft), a letto fluido (bollente e circolante), a letto trascinato e a ciclone. Queste diverse tecnologie di impianti si differenziano principalmente per il modo in cui la biomassa viene messa a contatto con l'agente gassificante.
- Pirolisi: è un processo di decomposizione termochimica ottenuto attraverso l'azione del calore, a temperature elevate (tra 400 e 800°C) e in assenza completa o quasi di agenti ossidanti (aria o ossigeno). Si generano contemporaneamente prodotti combustibili gassosi, liquidi e solidi, in proporzioni che dipendono dai metodi di pirolisi (pirolisi veloce, lenta o convenzionale) e dai parametri di reazione.

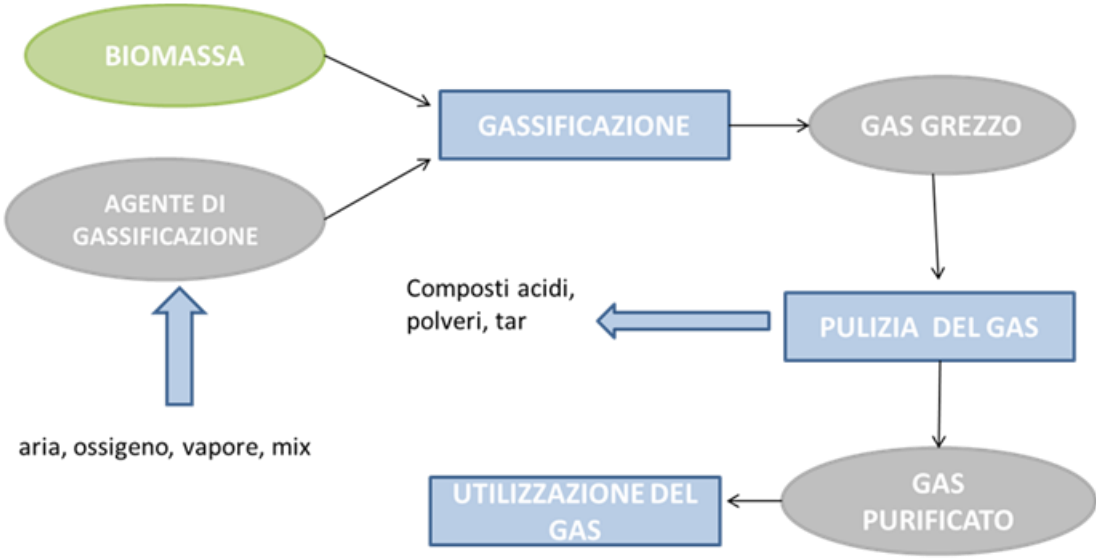


Figura 6 Schema del processo di gassificazione. Fonte Elaborazione personale adattata da CNR IIA, 2019.

Oggi i sistemi più evoluti (basati su motori a combustione interna, turbine e celle a combustibile) sono in grado di trasformare l'energia del combustibile in una produzione energetica finale con rendimenti complessivi anche prossimi al 90% (Vignini, 2012).
La capacità di produrre energia elettrica e termica (Figura 7) nello stesso impianto è definita cogenerazione. La cogenerazione può essere realizzata in grandi impianti industriali o in impianti di piccola e piccolissima taglia (mini e micro-cogenerazione).

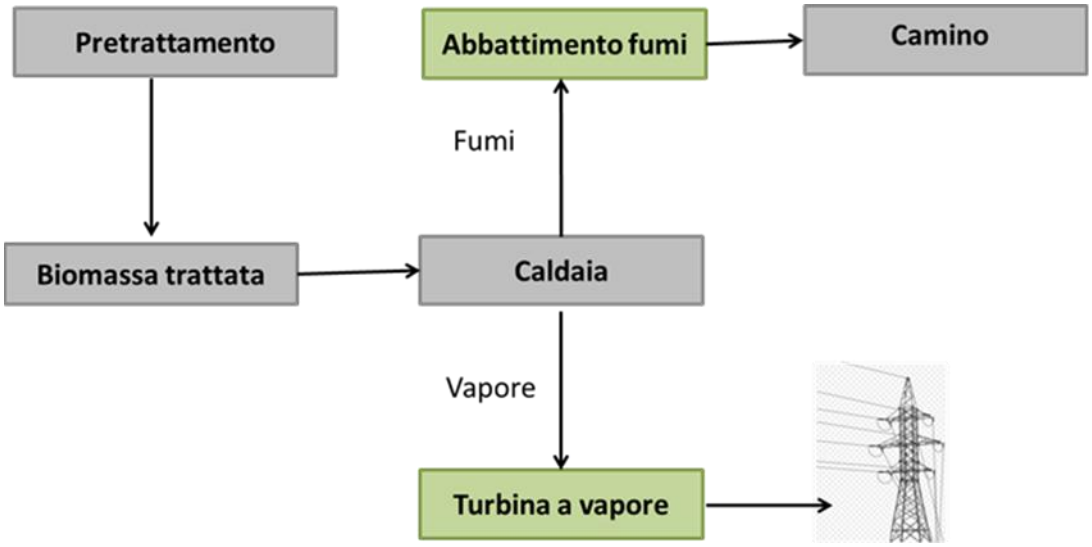


Figura 7 Schema semplificato di impianto di produzione di elettricità da biomasse solide. Fonte: Elaborazione personale adattata da Dispense Università Sapienza.

Tuttavia nel corso degli anni, l'evoluzione del settore ha evidenziato che i vantaggi conseguibili con impianti piccoli sono limitati, mentre la classe degli impianti di taglia superiore a 5 MWe consente di immettere in rete energia elettrica con regolarità e continuità per oltre 8000 ore/anno, senza dipendenza da fattori meteo e senza ciclicità giornaliere (FIPER, 2015). Il calore recuperato può essere impiegato tal quale all'interno di processi industriali o per usi civili oppure per la generazione di energia elettrica (Vignini, 2012). La cogenerazione è in grado di attuare un risparmio energetico fino al 27%, rispetto alla produzione separata delle medesime unità di energia termica ed elettrica, con una riduzione significativa delle emissioni (Roselli et al., 2011). Tuttavia, gli impianti a combustione attualmente operativi sul territorio nazionale hanno ancora molteplici difficoltà nel recuperare l'energia termica prodotta. Infatti in molte realtà, si opera in cogenerazione, ma con utilizzo di sola energia elettrica, mentre quella termica viene dissipata (FIPER, 2018).
L'impianto per la valorizzazione energetica delle biomasse da RSU è un termovalorizzatore, ossia un impianto di incenerimento dei rifiuti, costituito da una serie di unità per il pretrattamento della biomassa e da una unità di combustione–cogenerazione, simile a quella utilizzata per le altre biomasse solide: le caldaie a griglia mobile sono le più utilizzate in quanto in grado di trattare, con grande stabilità operativa, grossi volumi di rifiuti con composizione e potere calorifico molto variabili. La produzione di energia elettrica avviene tramite un gruppo turbina-alternatore, a cui segue la linea del trattamento dei fumi (Figura *8*), particolarmente pericolosi per questo tipo di matrice che è spesso caratterizzato da un tenore di cloro in massa anche superiore all'1% (Politecnico di Milano, 2011). Il calore sviluppato dal processo viene ceduto all'acqua che scorre nei tubi di un generatore di vapore: si ottiene così vapore surriscaldato che mette in moto una turbina e dei generatori producono energia elettrica, che viene immessa nella rete nazionale. Anche in questo caso il calore di scarto potrebbe essere recuperato e destinato al riscaldamento.
La maggior parte delle centrali a biomasse di grande taglia, presenti in Italia, sono centrali per la sola produzione di energia elettrica, alimentate con biomasse di origine agricola e/o industriale, oppure con un mix di biomasse e "combustibile da rifiuti" (CDR) di qualità. Al contrario, le centrali di media o piccola taglia sono a cogenerazione di elettricità e di calore, con il potenziale utilizzo di quest'ultimo soprattutto per usi industriali e per teleriscaldamento urbano.

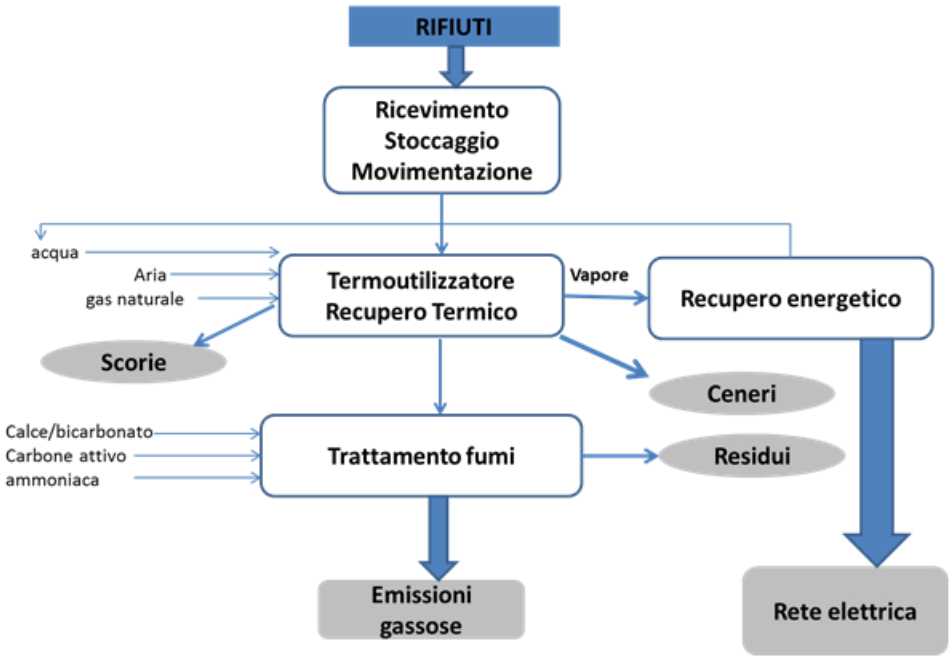


Figura 8 Schema a blocchi di un impianto di produzione di energia elettrica a partire da biocombustibile solido ottenuto da RSU (rifiuti solidi urbani). Fonte: Elaborazione personale adattata da Dispense UNINA, 2012.

3.2 Impatto socio-economico della filiera

L'elevato utilizzo di biomasse importate genera delle criticità legate al rischio di inefficienza energetica nel trasporto della biomassa, con conseguenti emissioni di gas serra in atmosfera. Pertanto, in Italia, le iniziative di promozione della "filiera corta" stanno aumentando, in accordo con la Proposta di Regolamento sul sostegno allo sviluppo rurale (2011) della Commissione Europea, che ha definito la filiera corta come una "filiera di approvvigionamento formata da un numero limitato di operatori economici che si impegnano a promuovere la cooperazione, lo sviluppo economico locale e stretti rapporti socio-territoriali tra produttori e consumatori". I criteri per la definizione di filiera corta sono: (i) la vicinanza geografica tra produttori e consumatori; (ii) la capacità di generare valore aggiunto e profitti su scala locale; (iii) l'equità sociale e un'equilibrata ridistribuzione del valore lungo la filiera; (iv) la sostenibilità ambientale (Masiero M. et al., 2013). Rispetto al contesto italiano, il concetto di filiera corta per le biomasse a fini energetici ha trovato un riconoscimento e una qualificazione normativa con il Decreto Ministeriale (DM) 2 marzo 2010. Secondo tale disposizione, si considerano da filiera corta biomasse prodotte entro il raggio di 70 km dall'impianto di produzione dell'energia elettrica. Tali disposizioni si applicano anche a biomasse derivanti da gestione forestale, colture agro-forestali dedicate e residui di trasformazione di prodotti forestali. In particolare, nel caso delle colture dedicate SRF, in Italia vengono utilizzate principalmente colture di pioppi, che hanno un ciclo stagionale di due anni; è ovvio che il rientro degli investimenti è legato alla durata di tale ciclo, ed è per questo che nel corso degli anni sono stati promossi sistemi contrattuali che tengano conto delle tempistiche delle colture e delle oscillazioni dei prezzi nel tempo, cercando di agevolare sia l'imprenditore agricolo (affinché possa aumentare la sua offerta di materia prima) sia le aziende trasformatrici della biomassa nell'acquisto della materia prima a un prezzo bloccato all'atto della stipula del contratto. Ne sono un esempio i contratti "Future commodities" (FIPER, 2015). Nel caso dei sottoprodotti, è risaputo che essi rappresentano una buona opportunità per diversificare le filiere di approvvigionamento, sia per l'uso energetico che per gli altri usi produttivi. In un'ottica di economia circolare, le diverse filiere di produzione e approvvigionamento saranno sempre più interagenti e funzionali l'una con l'altra e un

residuo potrà essere considerato sottoprodotto o materia prima a seconda della filiera. Un esempio è quello della segatura, definito residuo di prima lavorazione, tuttavia quotato con un valore di mercato corrispondente a una materia prima utilizzata per la produzione del pellet (FIPER, 2015). Nel caso delle potature del verde pubblico, anch'esse utilizzate in Italia come biomasse solide per ricavare energia, esse rientrano sia nell'ambito dei sottoprodotti (così come definite dal Ministero dello Sviluppo Economico), sia nell'ambito di applicazione dei rifiuti non pericolosi. La differente definizione ne modifica la destinazione d'uso finale e anche le caratteristiche economiche; nel primo caso rappresentano infatti un'importante fonte di ricavo nel secondo, invece, un costo di smaltimento per l'amministrazione pubblica. Si stima, infatti, che a livello nazionale, il quantitativo disponibile di potature del verde urbano si attesti intorno ai 3-4 milioni di tonnellate/anno, con un costo di smaltimento di circa 180-240 milioni di euro (quando vengo trattati come rifiuti da smaltire), mentre in caso di utilizzo come sottoprodotto per il riutilizzo energetico, si potrebbero ricavare circa 80-120 euro per tonnellata. Il beneficio economico complessivo per l'Amministrazione Pubblica potrebbe aggirarsi quindi intorno a 240-360 milioni di euro/anno. Appare chiaro che una corretta gestione di queste biomasse può generare un'interessante opportunità da perseguire, promuovere e salvaguardare, per ridurre le spese correnti e favorire nuove catene del valore (FIPER, 2015).
La filiera energetica delle biomasse solide è caratterizzata da una serie di tematiche interconnesse tra loro (Figura 9), dalle quali si evince quanto gli effetti della produzione energetica da biomasse sia di grande importanza sia da un punto di vista di policy che per gli operatori del settore.

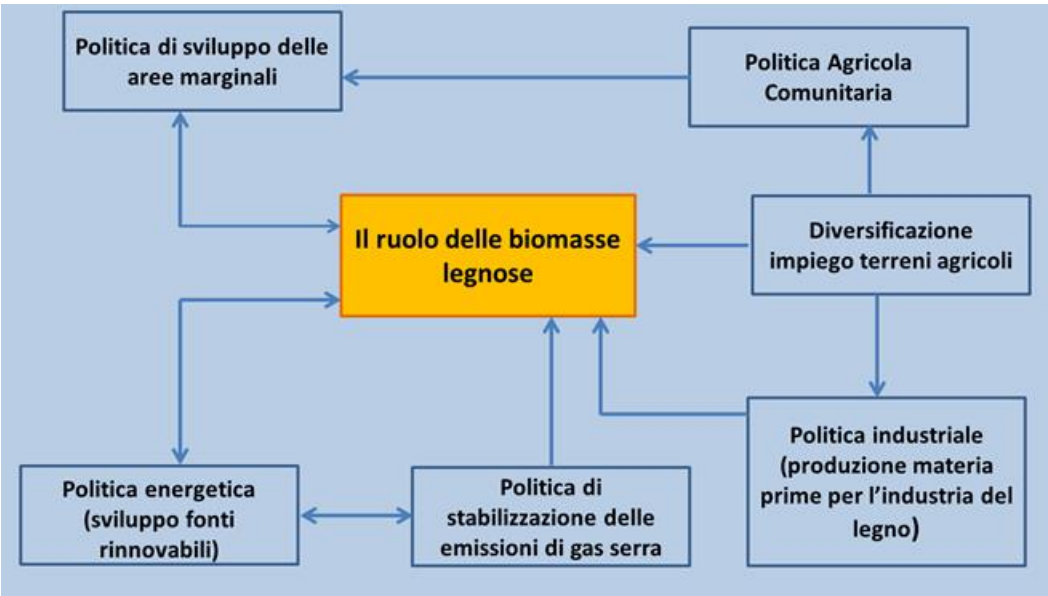


Figura 9 Tematiche connesse al ruolo attuale e potenziale delle biomasse legnose. Fonte: Elaborazione personale adattata da Fondazione Università Ca' Foscari, 2019.

Un esempio per comprendere la correlazione tra valorizzazione delle biomasse e politiche di sviluppo delle aree marginali è il fatto che le biomasse legnose sul territorio italiano spesso sono localizzate in aree rurali svantaggiate dal punto di vista logistico (aree abbandonate); occorre quindi una giusta politica che risponda ai fabbisogni energetici nazionali sfruttando al meglio la disponibilità potenziale di materiale legnoso anche sotto forma di materia prima (considerando la forte crescita delle superfici forestali italiane di cui si è accennato in precedenza).
Per analizzare l'impatto economico di una filiera bisogna considerare l'impatto diretto, indiretto e indotto. Il primo rappresenta il valore creato nel sistema economico direttamente dal settore oggetto di analisi e viene quantificato in termini monetari (investimenti effettuati) e occupazionali

(numero di occupati impiegati direttamente nel settore). Il secondo rappresenta il valore creato nel sistema economico dai settori fornitori, sia a monte che a valle della filiera, del settore oggetto di analisi; ne fanno parte, ad esempio, i fornitori di cippato, i trasportatori, le società che soddisfano direttamente la domanda proveniente dall'impianto; anche questo impatto viene quantificato sia in termini monetari che occupazionali. Il terzo rappresenta il valore creato nel sistema economico dal reddito distribuito (diretto ed indiretto) che, trasformandosi in parte in nuova domanda di consumi finali, attiva nuovi processi produttivi (circuito reddito-consumo) (FIPER, 2018).
Secondo una relazione annuale pubblicata dal Ministero della Transizione Ecologica sulla situazione energetica in Italia (MITE, 2022) risulta che nel 2021 sono stati investiti circa 50 milioni di euro in nuovi impianti di produzione di energia elettrica da biomasse solide. La gestione di tutto il parco impianti in esercizio attiva 6.308 unità di lavoro dirette e indirette. Il valore aggiunto generato per l'intera economia si attesta intorno a 256 milioni di euro per l'anno 2021 (MITE, 2022).
Un interessante studio italiano della Fondazione Università Ca' Foscari di Venezia ha identificato l'impatto socio-economico del settore della generazione di energia elettrica da biomasse solide in Italia, esaminando gli aspetti economici in termini di ricadute occupazionali, reddituali e fiscali, considerando il settore di produzione e approvvigionamento della biomassa, quello del trasporto e quello della produzione energetica nell'anno 2017. Questo studio ha anche evidenziato che il settore delle biomasse legnose non è in competizione con la filiera "food", ma anzi rappresenta in molti casi una filiera complementare ed in grado di portare ulteriori benefici per il mondo agricolo e forestale (Fondazione Università Ca' Foscari, 2019). Inoltre, dal "1° Rapporto socio-economico e ambientale 2019" promosso dall'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS), è emerso che il valore aggregato della produzione di energia e del suo indotto è stimato tra i 210 e i 280 milioni di euro e genera circa 1.300 posti di lavoro (rapporto 1:5 occupati diretti / indotto), con un reddito totale da lavoro pari a 22 milioni di euro. Tale analisi si è concentrata sull'attività annuale di alcuni degli impianti che fanno parte dell'Associazione EBS (9 impianti integrati con le filiere agricole, forestali e agro-alimentari).
In generale, dagli studi effettuati si è visto che gli effetti su occupazione e redditi da lavoro si distribuiscono in modo non uniforme tra i sotto-settori di approvvigionamento delle biomasse (comparto forestale, agricolo e agro-industriale). Il 56% dei redditi generati interessa il settore agricolo, il 40% va al settore forestale, mentre il restante 4% va al settore agro-industriale (a minore intensità di lavoro). A tal proposito, è importante ricordare come le ricadute occupazionali e reddituali per i settori agricolo e forestale siano particolarmente importanti dal punto di vista socio-economico, in quanto si innestano su una situazione di generale crisi di tali settori e vanno a svolgere quindi un ruolo di sostegno indiretto alle famiglie operanti nei settori agricolo e forestale.
Nel 2017, la produzione finale di energia ha generato (per il campione di impianti EBS considerato) un valore aggiunto di circa 151 milioni di euro, considerando i ricavi di esercizio utilizzando il prezzo di vendita dell'energia comprensivo degli incentivi (Fondazione Università Ca' Foscari, 2019). Per il settore di approvvigionamento delle biomasse è stato stimato un valore di 43 milioni di euro (tale valore può subire delle notevoli oscillazioni con variazioni fino a 70 milioni di euro annui), e per il settore trasporto 16 milioni. Pertanto, il valore aggiunto generato dall'intera filiera (approvvigionamento-trasporto-produzione) è pari a circa 210 milioni di Euro (Fondazione Università Ca' Foscari, 2019).
In Figura 10 sono mostrate le percentuali relative alla distribuzione del valore aggiunto (di energia prodotta, biomasse e trasporti) lungo la filiera.

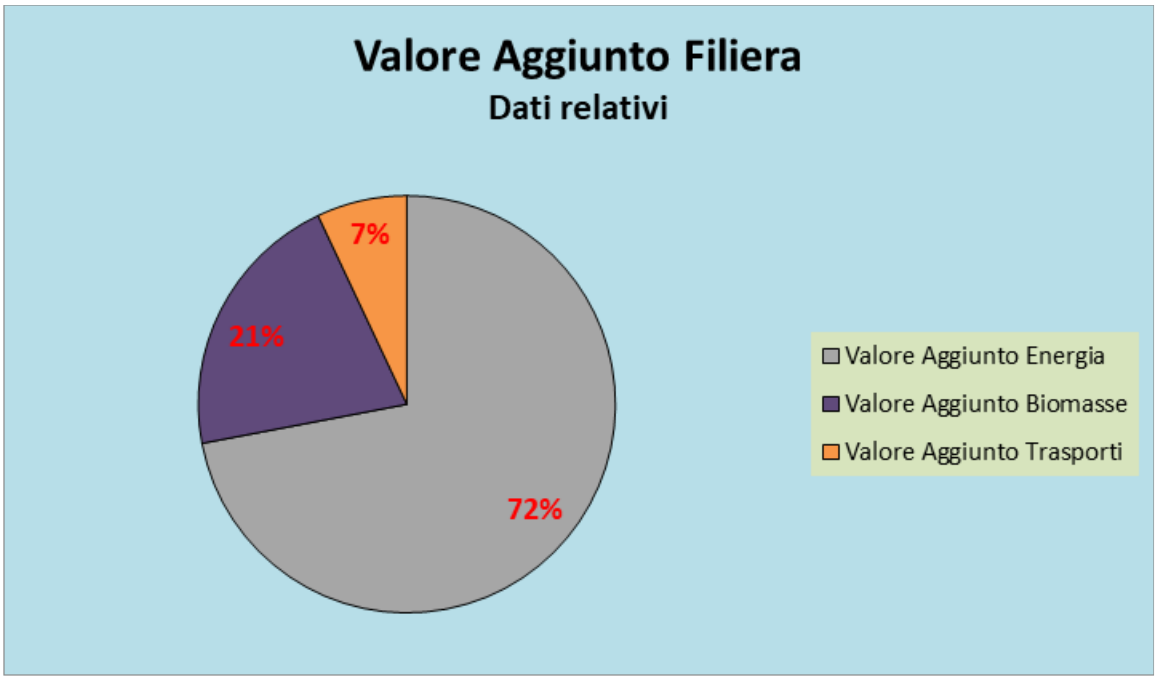


Figura 10 Distribuzione valore aggiunto lungo la filiera. Fonte: Elaborazione personale adattata da Fondazione Università Ca' Foscari, 2019.

Le stime di valore aggiunto ed effetti occupazionali offrono solo un quadro parziale dei benefici economici e sociali associati alla filiera della biomassa solida. Tali stime non includono altri importanti effetti economico-sociali, soprattutto locali, che non trovano riscontro nei valori contabili di costi e ricavi e la cui misura richiederebbe un'analisi economica approfondita delle dinamiche settoriali.

Per quanto riguarda la complessa e controversa filiera di produzione di energia elettrica da RSU, lo sviluppo tecnologico ha permesso ai moderni impianti di termovalorizzazione di diventare impianti Waste to Energy (WTE), più sostenibili rispetto ai vecchi inceneritori, ma sono necessari controlli rigorosi per evitare il loro impatto negativo sulla salute umana e sull'ambiente (Cucchiella et al., 2014). Ad oggi, la maggior parte dei termovalorizzatori in esercizio in Italia privilegia la produzione di energia elettrica, dato che essa è maggiormente remunerativa (grazie all'incentivo assicurato dai Certificati Verdi) rispetto alla produzione di energia termica, per la quale non è previsto alcun sistema di incentivazione specifico. Un ostacolo particolarmente rilevante alla realizzazione di questi impianti in Italia è rappresentato dall'accettazione degli stessi da parte delle comunità locali, che tipicamente esercitano forti pressioni contro l'entrata in esercizio di termovalorizzatori, anche in presenza di consistenti misure di compensazione del territorio locale.

Da questa panoramica generale, si può affermare che le ricadute positive dal punto di vista economico dell'utilizzo di biomasse solide a uso energetico riguardano soprattutto il consolidamento delle filiere locali dedicate all'approvvigionamento di residui forestali e agricoli, altrimenti inutilizzati, favorendo la diffusione dell'innovazione in agricoltura e contrastando lo spopolamento delle zone montane e rurali.

3.3 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità

Il crescente interesse nei riguardi delle biomasse è riconducibile alla necessità di raggiungere gli ambiziosi obiettivi per l'energia e il clima 2030, stabiliti dall'Unione Europea. Tali obiettivi prevedono: (i) una riduzione vincolante delle emissioni di gas serra, almeno del 40%, entro il 2030,

rispetto ai livelli del 1990; (ii) una quota dei consumi energetici coperta da rinnovabili pari almeno al 32%; (iii) un miglioramento almeno del 32,5% dell'efficienza energetica (Direttiva UE 2018/2001). In aggiunta alle considerazioni di politica energetica e sul clima, vi sono altre importanti ragioni alla base della crescente attenzione nei confronti delle biomasse (in particolare quelle solide), quali la progressiva riduzione della Superficie Agricola Utilizzata (SAU) del nostro Paese e i conseguenti impatti ambientali ed economici. L'attivazione di filiere bioenergetiche potrebbe generare un'inversione di tendenza, contrastando spopolamento e abbandono e rilanciando il ruolo delle attività agricole sia come "presidio" del territorio che come fattore di sviluppo e valorizzazione produttiva di aree ad alto rischio di marginalizzazione (CNR IIA, 2019).
Uno studio condotto da FIPER, nel 2015, sulla filiera italiana delle biomasse solide di origine forestale ha ipotizzato, per la filiera di produzione di energia elettrica da biomasse, il ricorso a un approccio "a cascata". Il concetto dell'approccio a cascata si basa sul criterio della valorizzazione economica ottimale del legname, secondo una scala di priorità d'impiego basata sul valore aggiunto potenziale dei prodotti. Secondo tale approccio, il legname dovrebbe prioritariamente essere destinato a prodotti legnosi a lungo ciclo di vita, al loro successivo riutilizzo, al riciclo e poi all'utilizzo per il recupero di bioenergia e, infine alla discarica (Figura 11).

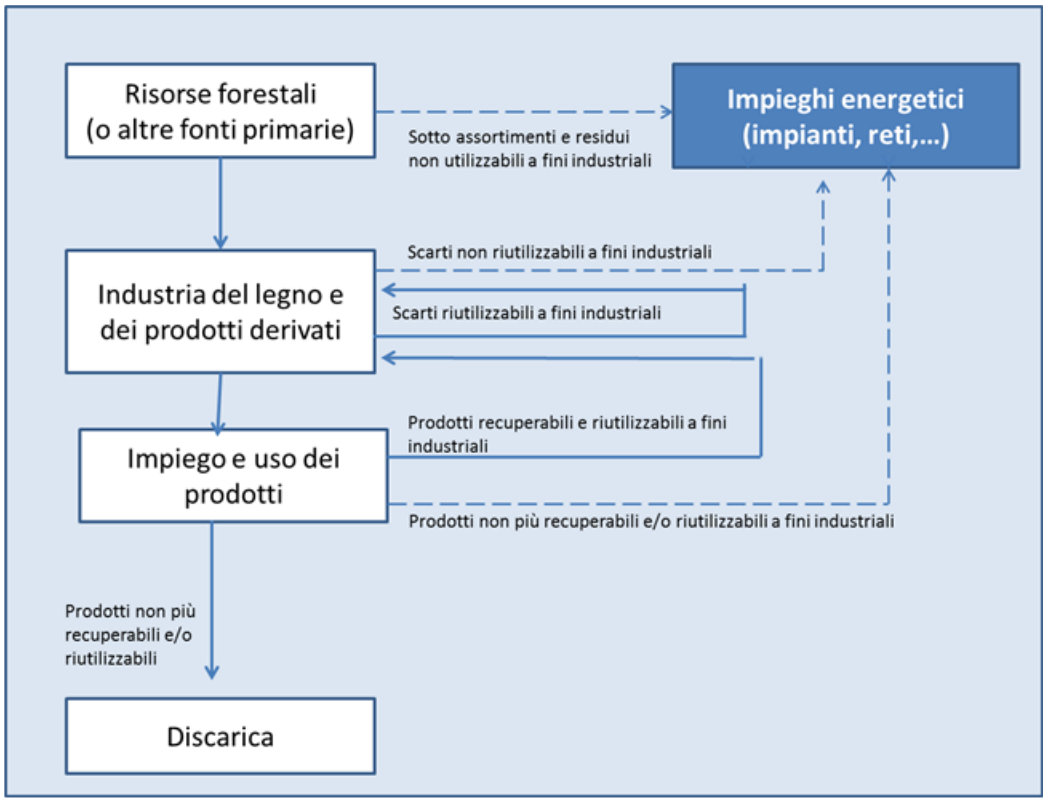


Figura 11 Schema di sintesi dell'approccio "a cascata" nell'impiego di biomasse legnose. Fonte: Elaborazione personale adattata da FIPER, 2015

Secondo questa logica, la gestione delle risorse forestali dovrebbe essere orientata il più possibile alla produzione di assortimenti da opera, da impiegare in settori come edilizia e arredi, mentre per gli impieghi energetici si dovrebbe fare ricorso in via preferenziale a sotto-assortimenti, residui di produzione non altrimenti impiegabili e prodotti arrivati a fine ciclo-vita e non adatti al recupero e riutilizzo a fini industriali.
Questo approccio ha il vantaggio di contenere i rischi di competizione tra settore industriale e delle bioenergie, rispetto all'accesso alle materie prime, ed è anche in linea con gli obiettivi della Strategia

Europa 2020, in particolare con il passaggio a un'economia caratterizzata da minori emissioni di gas serra e una più alta efficienza energetica e di impiego delle risorse. In sostanza l'approccio a cascata mira a favorire prodotti legnosi a lungo ciclo di vita, che sono in grado di stoccare carbonio nel tempo, impedendone la ri-emissione in atmosfera, nonché prodotti a più alto valore aggiunto, spesso caratterizzati dalla capacità di creare maggiori impatti occupazionali (FIPER, 2015).
Le tematiche ambientali e il fabbisogno energetico devono essere affrontati come sistema, tenendo conto della loro connessione reciproca, mettendo in pratica strategie di sviluppo sostenibile e di miglioramento continuo. È noto che il fabbisogno energetico è in costante aumento sia a livello mondiale, sia a livello locale. Inoltre, si ha la necessità di diminuire la percentuale di prodotti energetici acquistati all'estero, soprattutto quelli di origine fossile (CNR, IIA, 2019).
La produzione di energia da biomassa solida presenta grossi vantaggi dal punto di vista della sostenibilità ambientale. In particolare, la filiera bosco-legno-energia svolge un ruolo fondamentale nella gestione attiva del patrimonio boschivo, contribuendo così a prevenire e mitigare effetti negativi quali il dissesto idrogeologico (Fondazione Università Ca' Foscari, 2019).
Per valutare l'impatto sull'ambiente derivante dall'impiego delle biomasse solide a scopi energetici, è utile suddividere gli aspetti di sostenibilità tra effetti globali e regionali/locali, in base alla scala d'azione, in modo da impostare opportunamente la fase di valutazione (Castelli et al., 2016). Un esempio è rappresentato dalle emissioni atmosferiche che vengono prodotte da un qualsiasi processo: esse possono essere valutate globalmente quantificando le emissioni di gas serra, o localmente, quantificando le emissioni di particolato.
Gli effetti attesi a livello globale/nazionale sono sostanzialmente la diminuzione della concentrazione dei gas "ad effetto serra" in atmosfera e la riduzione della dipendenza energetica dai combustibili fossili importati dall'estero.
Fra gli effetti attesi a livello regionale/locale si annoverano benefici per i sistemi colturali e il contenimento degli impatti ambientali legati alle emissioni in aria, acqua, suolo rispetto alla produzione energetica da fonti fossili (Castelli et al., 2016). Tali aspetti sono definibili e quindi valutabili in funzione della struttura e dimensione delle filiere. La sostenibilità ambientale delle filiere agro-energetiche è stimata attraverso l'utilizzo di specifici indicatori che possono dare informazioni a livello quantitativo circa l'effettivo conseguimento di obiettivi di miglioramento ambientale, individuati di volta in volta dalla politica nazionale e/o internazionale. Fra questi indicatori quelli più significativi sono le emissioni in termini di CO_2 equivalente, l'efficienza energetica e il cambiamento di destinazione del suolo.
I principali criteri di sostenibilità ambientale riguardano il suolo agricolo (in termini di erosione dei suoli, inquinamento da fertilizzanti, pesticidi e metalli pesanti), l'acqua (in termini di utilizzo delle acque per irrigazione, inquinamento delle acque a seguito di utilizzo di fertilizzanti e pesticidi), l'aria (in termini di emissioni di gas climalteranti e/o acidificanti) e la biodiversità (Castelli et al., 2016).
Per essere ecosostenibili, le filiere agro-silvo-energetiche devono: (i) essere corte, ossia con impianti di conversione vicino a grandi fonti di biomassa, per ridurre la quantità di combustibile necessaria per il trasporto (Cambero et al., 2014); (ii) essere opportunamente dimensionate per garantire un approvvigionamento costante e continuo di biomassa locale agli impianti di conversione; (iii) garantire un bilancio energetico positivo e una produzione complessiva di CO_2 negativa o nulla; (iv) contribuire a una efficiente fissazione di carbonio nel suolo, alla lotta al degrado e all'erosione del suolo e al miglioramento della qualità dei suoli (Colantoni et al., 2016; Corona et al., 2019).
Per quanto riguarda la filiera di produzione energetica a partire dalle biomasse da RSU, questa consente di ridurre drasticamente i quantitativi di rifiuti urbani avviati in discarica, incrementando parallelamente la produzione energetica da fonti rinnovabili. Per la conversione energetica gli RSU devono essere trasformati in Combustibili Solidi Secondari (CSS). Questo processo è complementare

alla raccolta differenziata e, pertanto, consente un ulteriore recupero di quei materiali riciclabili che sfuggono alla raccolta differenziata.

3.3.1 Certificazioni e normative ambientali legate alla filiera

La diffusione dell'utilizzo delle biomasse solide a fini energetici ha reso inevitabile a livello internazionale il dibattito per definire criteri chiari e univoci atti a garantire la sostenibilità del comparto. Nel contesto italiano, si impongono considerazioni circa le modalità più corrette per sostenere l'offerta interna, orientandola verso criteri di qualità e responsabilità (ad esempio, per le biomasse di origine forestale tramite la diffusione dei sistemi di certificazione per la gestione forestale sostenibile, rendendola obbligatoria quando l'impresa beneficia di aiuti pubblici) e facendo sì che ci sia un più ampio processo di sviluppo del settore agro-forestale su scala locale (Corona et al., 2019).

Le certificazioni legate alla filiera più conosciute e utilizzate in Italia sono quelle relative alla gestione responsabile e sostenibile delle foreste: la FSC (Forest Stewardship Council) e la PEFC (Programme for Endorsement of Forest Certification schemes).

FSC è un'organizzazione indipendente non governativa (ONG) di portata internazionale, istituita nel 1993, avente sede a Bonn in Germania. Il suo obiettivo consiste nel "promuovere una gestione delle foreste del mondo che sia rispettosa dell'ambiente, socialmente utile ed economicamente sostenibile". FSC Italia nasce a Padova nel 2001 con gli stessi obiettivi e missioni di FSC internazionale, assumendo un ruolo estremamente importante nell'industria italiana del legno (Santambrogio, 2021). L'adozione del marchio FSC è volontaria, ha durata di cinque anni e si suddivide in due tipologie di certificazioni: la certificazione di gestione forestale FM (Forest Management) e la certificazione di catena di custodia CoC (Chain of Custody).

La certificazione FM può essere: (i) individuale, se è volta a certificare una sola foresta o piantagione; (ii) di gruppo, se un'unica certificazione certifica più foreste o piantagioni sotto diverse proprietà e (iii) small and low intensity forests (SLIMF), consistente in certificati pensati appositamente per piccole foreste con bassa intensità di prelievo del legname.

Per ottenere la certificazione FSC di tipo FM, attraverso il consenso e la partecipazione dei vari stakeholder, sono eseguite valutazioni delle procedure e modalità con cui sono gestite le foreste, dalle prime fasi di organizzazione delle operazioni fino alle fasi di estrazione della materia prima, che devono rispettare i principi e i criteri definiti da FSC (Santambrogio, 2021). Per quanto riguarda il certificato CoC, esso garantisce che le materie prime utilizzate dalle aziende che trasformano e vendono i prodotti delle foreste, provengano da foreste e piantagioni certificate FSC, consentendo di applicare sulle etichette dei prodotti il marchio FSC. Oltre ai prodotti contenenti materie prime del bosco, possono essere certificati anche quelli contenenti materiale riciclato.

Come il certificato FM, la certificazione CoC può essere: (i) individuale, se attribuita a singole organizzazioni; (ii) di gruppo, se è concessa a più organizzazioni e (iii) di singoli progetti, se viene applicata a determinati settori che prevedono standard specifici.

Oltre a questi due certificati, FSC permette di certificare e controllare il legno che è stato ricavato da foreste prive di certificazione che verrà poi mischiato con quello certificato per la creazione di prodotti etichettati FSC Misto. Solo il legname proveniente da fonti considerate da FSC accettabili viene sottoposto alle fasi di controllo (per esempio, non è considerato accettabile il legno proveniente da foreste con alberi geneticamente modificati o se tagliato illegalmente e in violazione di diritti civili e normative ambientali).

PEFC è un'associazione senza scopo di lucro, nata a Parigi nel 1999, tramite iniziativa del settore privato, mentre PEFC Italia è stata istituita nel 2001 a Perugia. PEFC è nata con l'obiettivo di promuovere l'adozione di una gestione forestale di tipo sostenibile, consentendo di beneficiare dei

prodotti delle foreste ma, allo stesso tempo, di garantire la loro salute, anche per le future generazioni.
La certificazione PEFC, come la FSC, è volontaria, ha una validità di cinque anni e per ottenerla devono essere rispettati determinati requisiti standard a livello nazionale, approvati da tutti gli eventuali stakeholder. Anch'essa si suddivide in un certificato di gestione forestale sostenibile e in uno di catena di custodia. Il primo permette di garantire che le foreste siano gestite nel rispetto di stringenti requisiti ambientali. Nel caso di proprietari di piccole foreste e piantagioni, si ha la possibilità di adottare una certificazione di gestione forestale di gruppo. I gruppi possono essere definiti da associazioni forestali, in base ad un'area geografica, ad accesso libero, indipendentemente dalla posizione geografica, o dalle associazioni di appartenenza (Santambrogio, 2021).
Il certificato di catena di custodia offre una garanzia sulla provenienza da foreste certificate PEFC di materiali boschivi e arborei contenuti nei prodotti, assicurandone la tracciabilità tramite le apposite etichette applicate sugli articoli. Anche in questo caso, si ha la possibilità di acquisire la certificazione di gruppo per renderla raggiungibile e conveniente alle piccole imprese.
In aggiunta, PEFC permette di certificare e garantire materiali e prodotti riciclati, anche se privi di certificazione, se conformi ai principi standard definiti dall'organo e alle norme vigenti, consentendo in questo modo alle aziende di non modificare i propri fornitori di materiale riciclato che non adottano alcuna certificazione. La certificazione PEFC, essendo una certificazione di terza parte, non viene accreditata direttamente da PEFC, ma da organismi di certificazione esterni, indipendenti ed accreditati, sotto il controllo e la valutazione dell'ente di accreditamento italiano Accredia.
Per dare maggiore chiarezza e praticità alle imprese dell'industria del legno sugli standard sostenibili da seguire e rispettare, FEMB (The European Office Furniture Federation) ha fissato uno standard unico di sostenibilità chiamato Level-FEMB, diventando la prima certificazione ambientale e sostenibile a livello europeo ad essere utilizzata nella filiera del legno che ricopre molteplici aspetti della sostenibilità ambientale. Nello specifico, Level-FEMB identifica quattro macro-categorie di criteri sostenibili da rispettare: responsabilità sociale, materiali, salute umana ed ecosistema – energia – atmosfera, con particolare riferimento al settore dei mobili d'ufficio e non domestici d'interno. Level-FEMB è strutturata su tre livelli che rappresentano il numero di requisiti standard minimi che l'impresa deve rispettare (Santambrogio, 2021).
Nel contesto produttivo ed industriale della filiera italiana delle biomasse solide, svolgono un ruolo importante alcune normative ambientali, il cui rispetto, spesso, può essere trasformato in certificazioni tramite l'attività di accreditamento da parte di enti terzi. La norma adottata più comunemente nell'industria italiana è la UNI EN ISO 14001. Questa norma indica le caratteristiche essenziali di un sistema di gestione ambientale che consentano alle organizzazioni di creare valore aggiunto per l'ambiente, gli stakeholder e alle organizzazioni stesse. Il soddisfacimento dei requisiti stabiliti dalla norma UNI EN ISO 14001 porta all'organizzazione molteplici vantaggi, tra cui: diminuzione degli sprechi e dei rifiuti, salvaguardia del patrimonio aziendale, incremento positivo di immagine e di reputazione dell'azienda, monitoraggio e conformità legislativa degli aspetti ambientali coinvolti nel sistema di gestione ambientale, agevolazioni nelle operazioni di finanziamento e riduzione delle complessità burocratiche e amministrative.
Un'ulteriore normativa rilevante sotto il profilo ambientale applicata alla filiera delle biomasse solide è data dalla UNI EN ISO 14020, la quale disciplina e definisce i principi generali per l'adozione di tre tipologie di etichette ambientali sui prodotti delle aziende (Santambrogio, 2021).
La prima tipologia è rappresentata dalle etichette di tipo I, che garantiscono il rispetto di determinati criteri ambientali sulla base dell'intero ciclo di vita del prodotto. Questa categoria di etichette è sottoposta a certificazione da enti terzi. Oltre alle etichette di tipo I, si possono adottare quelle di tipo II, che consistono in una auto-dichiarazione delle aziende riguardo alle azioni di salvaguardia

ambientale intraprese. Infine, le etichette di tipo III corrispondono a dichiarazioni ecologiche contenenti informazioni e parametri ambientali quantificabili sulla base dell'analisi del ciclo di vita dei prodotti dell'impresa e sono convalidate da organismi indipendenti.
L'adozione di queste etichette è volontaria e il loro scopo è quello di informare e aiutare i consumatori a scegliere i prodotti con il minore impatto sull'ambiente, consentendo alle imprese di essere più competitive sul mercato e di essere più efficienti in tema di sostenibilità ambientale.
Un esempio di etichetta ambientale di tipo I è costituito dal marchio Ecolabel Ue, il quale è un'etichetta volontaria adottata dall'Unione Europea, istituita nel 1992 per mezzo del Regolamento (CEE) n. 880/1992 e oggi disciplinato dal Regolamento (CE) n. 66/2010 e modificato dal Regolamento (EU) n. 782/2013. Il marchio Ecolabel Ue prevede il soddisfacimento di alcuni criteri minimi ambientali definiti a livello europeo tenendo conto dell'intero ciclo di vita dei beni e di vari stakeholder. L'etichetta in questione si rivolge ai consumatori, in quanto tramite l'acquisto di prodotti certificati si contribuisce a ridurre i rifiuti, l'inquinamento e il consumo energetico e idrico, favorendo così la tutela dell'ambiente. In aggiunta, i prodotti Ecolabel, oltre ad essere certificati sulle loro prestazioni d'utilizzo, presentano prezzi accessibili e sono facilmente reperibili, mentre dal lato dei produttori, il marchio permette di renderli maggiormente visibili e competitivi sul mercato.
Per quanto riguarda la qualità dei combustibili legnosi in Italia, in base alla natura e provenienza della materia prima e alle sue proprietà chimico-fisiche, attualmente esistono le seguenti normative tecniche di riferimento (Regione Marche, 2013):

- UNI/TS 11264:2007 Biocombustibili solidi - Caratterizzazione di legna da ardere, briquette e cippato.
- UNI/TS 11263:2007 Biocombustibili solidi - Caratterizzazione del pellet ai fini energetici.
- Raccomandazione tecnica CTI - R 04/5 - Pellet (superata dalla UNI/TS 11263:2007 per il pellet).
- Pellet GOLD (basato su norme CEN 14961, ONORM M 7135, DINplus e sui limiti introdotti dal Pellet Fuel Institute) - AIEL – Pellet.

4 Gruppo di lavoro

Responsabili ENEA dello studio di filiera: **Giuliana Ansanelli, Gabriella Fiorentino, Amalia Zucaro**

Nome	**Ente/impresa**	**Tipologia1**	**Sito web**	**Contatti**
Amalia Zucaro	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	amalia.zucaro@enea.it tel: 081-7723613
Gabriella Fiorentino	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	gabriella.fiorentino@enea.it Tel. 081-7723626
Giuliana Ansanelli	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	giuliana.ansanelli@enea.it Tel.: 081-7723367
Antonietta Cerbone	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	antonietta.cerbone@enea.it Tel.: 081-7723428
Alessandro Giocoli	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	alessandro.giocoli@enea.it Tel.: -
Vincenzo Motola	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	vincenzo.motola@enea.it Tel.: 0332 788 226
Flavio Scrucca (revisore)	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	flavio.scrucca@enea.it

Si ringrazia la dr.ssa Noemi Pecchia dell'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS), per le informazioni fornite sull'origine e sui quantitativi di biomasse solide consumate annualmente dagli impianti delle aziende associate, sulla percentuale media di autoconsumo energetico, sul rendimento elettrico medio e sulla tipologia di impianti di combustione.

5 Ambito di applicazione dello studio

Il progetto Arcadia mira a costruire dei dataset contenenti dati riferiti al contesto italiano, per le filiere più significative a livello nazionale. Fra queste, la filiera di produzione del mix elettrico nazionale è stata individuata come una di quelle di maggiore interesse per il progetto. Alla produzione del mix elettrico nazionale, le fonti rinnovabili contribuiscono per oltre il 40%. Pertanto, al fine di costruire un dataset del mix elettrico italiano, sono stati raccolti dati relativi a selezionate filiere energetiche da fonti rinnovabili. In particolare, nell'ambito del progetto, è stata analizzata la filiera delle bioenergie, in quanto ha caratteristiche strettamente legate al territorio italiano e dunque tipiche del contesto nazionale. In seguito ad una ricognizione qualitativa e quantitativa delle biomasse utilizzate negli impianti di conversione operanti sul territorio nazionale, sono state identificate le seguenti filiere bio-energetiche che saranno oggetto dell'analisi del ciclo di vita LCA, secondo le norme ISO 14040-44 (ISO, 2006 a,b):

- Biomasse solide
- Biogas
- Biocombustibili

In questo studio è stata analizzata la filiera di produzione di energia da biomasse solide al fine di ottenere il dataset da utilizzare nella Banca Dati Italiana (BDI) di LCA, prevista dal progetto.

5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento

L'unità funzionale (UF) scelta è la produzione di 1 kWh di energia elettrica da biomasse solide in Italia. Si specifica che la produzione di energia è considerata al netto dell'autoconsumo (Tabella 6). Inoltre, l'UF è stata scelta in modo da permettere l'integrazione del presente studio nel più ampio dataset del mix energetico nazionale.

Tabella 6 Unità funzionale e flusso di riferimento dello studio

Unità Funzionale	Produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide, in Italia
Flusso di riferimento	1 kWh elettrico da biomasse solide, in Italia

5.2 Confini del sistema

In Figura 12**Error! Reference source not found.** sono rappresentati i confini del sistema investigato. I dati raccolti per la costruzione della Banca Dati Italiana (BDI) LCA della filiera energetica delle biomasse solide sono relativi all'energia prodotta esclusivamente a partire dalle biomasse solide di scarto (materiale residuale da filiera forestale, agro-industriale e agricola o scarti dell'industria di prima o seconda lavorazione del legno e biomasse da RSU). Tali dati si possono considerare rappresentativi della situazione reale, dato che le biomasse solide da colture dedicate rappresentano una percentuale marginale (5%) delle biomasse solide sfruttate a fini energetici.
Sebbene nella BDI di Arcadia siano presenti dataset utili per stimare l'impatto della produzione di alcune delle biomasse solide di scarto usate a fini energetici (es. dataset del cippato forestale), in questo studio LCA, è stato applicato l'approccio "zero burden", ossia non è stato considerato il carico ambientale del processo che genera lo scarto, in accordo con la letteratura di settore (Clift et

al.,2000; Ekvall et al.,2007; Nakatani, 2014). Di conseguenza, i confini del sistema, definiti secondo un approccio *cradle-to-gate* (dalla culla al cancello), includono il trasporto delle biomasse residuali o di scarto (da Rifiuti Solidi Urbani – RSU - o di origine industriale e agro-forestale) presso gli impianti di conversione e i processi di trasformazione delle biomasse in energia con i relativi rifiuti (solidi, liquidi e gassosi). In particolare, il trasporto contemplato è sia quello su gomma, per le biomasse trasportate sul territorio nazionale (100% delle biomasse da RSU e 90% delle biomasse di scarto di origine agro-forestale) ed europeo (8% delle biomasse di scarto di origine agro-forestale), sia quello via nave, per le biomasse provenienti da USA e Canada (2% delle biomasse di scarto di origine agro-forestale). Inoltre, per l'elettricità prodotta, è stato considerato un autoconsumo dell'11%, nel caso di impianti alimentati da biomasse residuali derivanti dai settori industriale e agro-forestale, e del 15%, nel caso di processi di produzione elettrica che sfruttano le biomasse da RSU. Infine, il calore prodotto è stato considerato completamente disperso e, pertanto, non è stato incluso nei confini del sistema.

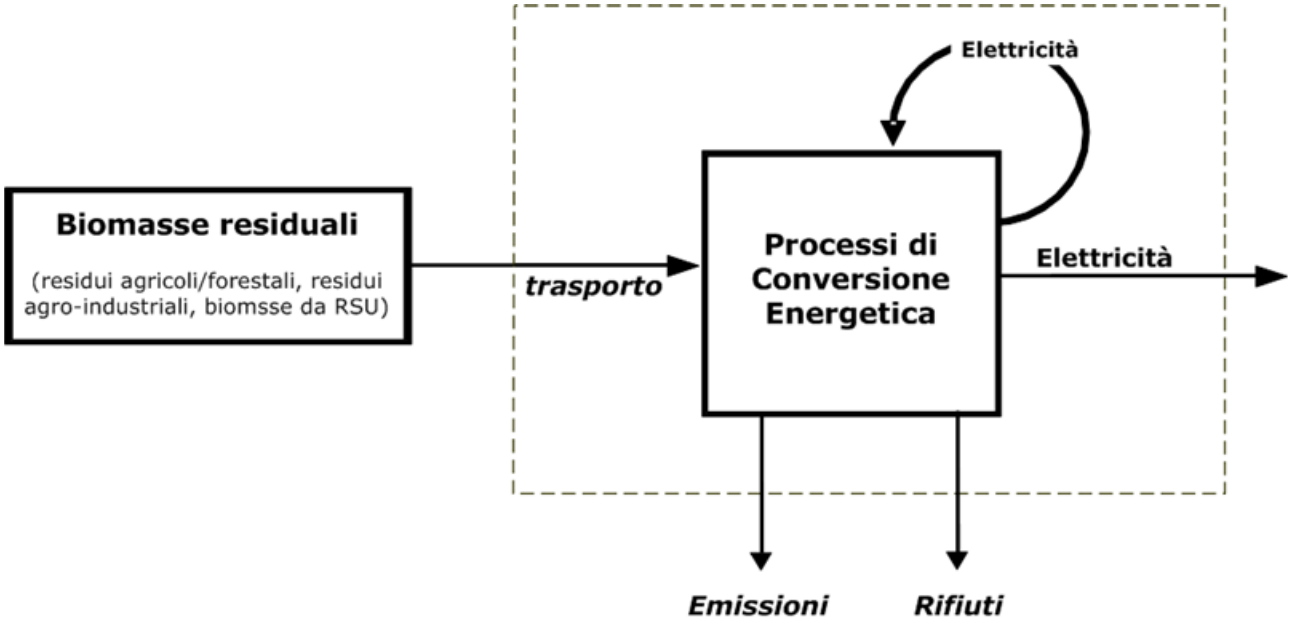


Figura 12 Confini del sistema per le biomasse di scarto, dal "dalla culla al cancello" (approccio "zero burden").

5.3 Assunzioni e giudizi di valore

In questo studio, sono stati utilizzati sia dati primari che secondari.
In particolare, sono stati impiegati **dati primari** per i seguenti flussi:

- quantitativi di biomassa residuale e di acqua consumati per la produzione di 1 kWh di elettricità, mediante biomasse da Rifiuti Solidi Urbani (RSU) (processo CL2) e tramite altre biomasse (processo CL1);
- tipologia e quantità di rifiuti liquidi e solidi generati, nel processo di produzione elettrica, a partire da biomasse diverse da RSU ("altre biomasse", processo CL1). Pertanto, è stato utilizzato uno specifico processo di trattamento, della banca dati Ecoinvent v. 3.7.1, per ciascun tipo di rifiuto (inerti, pericolosi ed acque reflue) generato.

Per tutti gli altri flussi e processi sono stati impiegati **dati secondari**. In dettaglio, per il processo di **produzione elettrica** a partire dalle biomasse solide provenienti dai comparti forestale, agricolo ed

agroindustriale, ossia da "**altre biomasse**" **(processo CL1)**, sono stati utilizzati dati secondari, relativi al contesto italiano, per descrivere i processi di pretrattamento (cippatura) e trattamento (conversione energetica) della biomassa solida. In particolare, per il processo di cippatura, i dati sono stati tratti dal Report Arcadia "Studio di filiera – Cippato forestale) di Scrucca et al. (2021), mentre per il processo di conversione energetica sono stati usati i dati del processo di Ecoinvent v. 3.7.1 "*Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U",* privato del quantitativo di biomassa, delle emissioni e del trattamento dei rifiuti. Infatti, per i quantitativi di biomassa, come già detto, si disponeva di dati primari e, per le emissioni generate durante la produzione di elettricità, sono stati impiegati i dati di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) del 2019. Inoltre, le percentuali di provenienza delle biomasse sono state determinate sulla base di documenti relativi al contesto nazionale (Enti Locali Online e FIPER, 2015) e, per il processo di trasporto, si è fatto uso di dati medi europei e globali derivanti da processi di Ecoinvent v. 3.7.1. In dettaglio, per il trasferimento delle biomasse di origine italiana ed europea, è stato ipotizzato un trasporto su gomma per il quale sono stati usati i dati medi europei tratti dal processo di Ecoinvent *Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U.* Invece, il trasporto, via mare, delle biomasse provenienti da USA e Canada è stato descritto, impiegando i dati medi a livello mondiale, ricavati dal processo di Ecoinvent *Transport freight, sea, container ship{GLO}|market for transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U.*

Infine, riguardo alle distanze percorse sono state fatte le seguenti assunzioni:

- la biomassa di origine italiana è trasportata per una distanza pari a 70 km (filiera corta), in accordo col DM 2/3/2010;
- per la biomassa proveniente dall'Europa è stata considerata la distanza media europea per il trasporto delle merci su strada, riportata dall'ISTAT, per il 2018;
- la distanza via mare, da USA e Canada, è stata calcolata, considerando il tragitto attraverso porti commerciali di rilievo (Montreal, per il Canada, New York, per gli Stati Uniti e Genova, per l'Italia), mentre, per il trasferimento, tramite camion, sul territorio nazionale, è stata considerata la distanza media italiana percorsa dalle merci su gomma, indicata dall'ISTAT per il 2018.

Per quanto riguarda il **processo di produzione elettrica da biomasse da RSU (processo CL2**, termovalorizzazione), sono stati utilizzati i dati secondari, mediati a livello mondiale, del processo di Ecoinvent "*Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U*", privo delle emissioni in aria. Infatti, per le emissioni generate dalla termovalorizzazione, sono stati usati i dati ISPRA del 2019, specifici per questa tipologia di combustione. Infine, per le ipotesi sulla distanza di trasporto della biomassa da RSU, si è fatto riferimento al DM 2/3/2010 (70 km) ed il processo di trasporto è stato descritto impiegando i dati medi europei derivati dal processo di Ecoinvent v. 3.7.1 "*Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U".*

In Tabella 7, è descritta la qualità dei dati di foreground del dataset relativo al processo di produzione di elettricità a partire dalle biomasse solide provenienti dai comparti forestale, agricolo ed agroindustriale ("altre biomasse", processo CL1).

Tabella 7 Qualità dei dati di foreground del dataset relativo al processo di produzione di elettricità a partire da "altre biomasse" (processo CL1).

Aspetto qualitativo	Giudizio	Note
Rappresentatività Temporale (RT)	Molto buona	Nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 3 anni lo studio di filiera, eccetto quelli relativi ai Paesi esteri di provenienza delle biomasse.
Rappresentatività Geografica (RG)	Molto buona	Il processo descritto è rappresentativo del luogo geografico indicato negli studi di filiera
Rappresentatività Tecnologica (RTec)	Buona	Il processo descrive in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato, ma alcuni flussi, giudicati non rilevanti sulla base di giudizio di esperti, non sono stati quantificati
Affidabilità (A)	Buona	I dati sono in parte primari e in parte calcolati/provenienti da letteratura, ma tutti controllati da esperti.

In Tabella 8, è descritta la qualità dei dati di foreground del dataset relativo al processo di produzione di elettricità a partire da biomasse da RSU (processo CL2).

Tabella 8 Qualità dei dati di foreground del dataset relativo al processo di produzione di elettricità a partire da biomasse da RSU (processo CL2).

Aspetto qualitativo	Giudizio	Note
Rappresentatività Temporale (RT)	Molto buona	Nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 3 anni lo studio di filiera.
Rappresentatività Geografica (RG)	Molto buona	Il processo descritto è rappresentativo del luogo geografico indicato negli studi di filiera
Rappresentatività Tecnologica (RTec)	Buona	Il processo descrive in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato, ma alcuni flussi, giudicati non rilevanti sulla base di giudizio di esperti, non sono stati quantificati
Affidabilità (A)	Buona	I dati sono in parte primari e in parte calcolati/provenienti da letteratura, ma tutti controllati da esperti.

5.4 Gestione della multifunzionalità

Nel modello sviluppato per analizzare la filiera energetica delle biomasse solide l'elettricità è stata considerata come unico prodotto. Infatti, dai dati primari raccolti, è emerso che nella maggior parte degli impianti in Italia, sia quelli che utilizzano biomassa da RSU che quelli che utilizzano altre biomasse, viene recuperata soltanto energia elettrica (con relativa perdita di energia termica) e, di conseguenza, il calore generato è stato considerato completamente disperso. Ciò nonostante, visto che gli impianti di combustione e cogenerazione si stanno rapidamente adeguando alla necessità di recuperare anche il calore prodotto, è stata effettuata un'analisi di sensitività valutando la possibilità di co-produrre e recuperare sia elettricità che calore. In tal caso, la multifunzionalità è stata gestita attraverso l'allocazione exergetica tra elettricità e calore prodotti al netto dell'autoconsumo. Infatti, in questo caso non è possibile utilizzare né un'allocazione basata sulla massa né una economica che è ritenuta poco opportuna, a causa del rischio di volatilità dei prezzi (Goedkoop, 2016). Inoltre, l'allocazione puramente energetica non sarebbe in grado di tener conto

adeguatamente delle differenze, in termini di qualità, dell'energia contenuta nei prodotti ottenuti. Infatti, a parità di kWh, l'energia elettrica ha una maggiore capacità di compiere lavoro rispetto al calore. Una metrica appropriata per evidenziare tale differenza è la frazione del contenuto di exergia di ogni prodotto rispetto al totale del lavoro compiuto, cioè la capacità termodinamica dei prodotti di sostenere ulteriori trasformazioni. L'exergia è definita, infatti, come la quantità di lavoro che una risorsa può fornire quando viene portata in equilibrio termodinamico con l'ambiente circostante (Bejan, 1989). I prodotti energetici possono essere confrontati senza fare riferimento al loro valore di mercato, ma con riferimento alle loro prestazioni ambientali. Inoltre, l'exergia permette un confronto nel tempo, essendo una misura indipendente dal tempo.
Gli impatti del processo sono stati allocati ai prodotti in proporzione al loro contenuto di exergia. In dettaglio, per convertire le due forme di energia in exergia, è stata applicata la seguente equazione:

$$\text{Exergia totale } (kWh_{ex}) = \text{Elettricità } (kWh_{el}) + \sigma_{th} * \text{Calore } (kWh_{th}) \quad (1)$$

Dove σ_{th} è il Fattore di Carnot che è definito come segue:
Fattore di Carnot (σ_{th}) = 1 - (Ta/Td)
Ta: temperatura ambiente;
Td: temperatura del calore ottenuto dal processo di cogenerazione;

Per il calore, σ_{th} è stato posto uguale a 0,3546 (Supplemento ordinario n. 42/L alla GAZZETTA UFFICIALE Serie generale - n. 285, del 30 novembre 2021).
Le percentuali di allocazione sono state calcolate come segue:
% di allocazione Elettricità: Elettricità (kWh_{el})/ Exergia totale (kWh_{ex})
% di allocazione calore: σ_{th} * Calore (kWh_{th})/ Exergia totale (kWh_{ex})

In Tabella 9, sono riportati i valori di allocazione per i sistemi analizzati.

Tabella 9 Valori di allocazione exergetica per le classi energetiche individuate.

Allocazione Exergetica		
Output	**Energia da "altre biomasse" (processo CL1)**	**Energia da "Biomasse da RSU" (processo CL2)**
Energia Elettrica (EE)	49%	45%
Calore	51%	55%

5.5 Revisione critica

La metodologia del progetto Arcadia prevede la revisione critica degli studi LCA di filiera; questo lavoro è stato revisionato da personale interno ENEA, esperto di LCA e non coinvolto nello studio.
Il revisore ha verificato e validato lo studio LCA (inclusi i dati raccolti, calcolati e stimati e il modello LCA), il rapporto tecnico e i dataset, arrivando a formulare un giudizio critico sulla qualità del lavoro. La verifica ha assicurato la conformità dello studio LCA alle norme ISO 14040-44, mentre la validazione è servita a garantire la consistenza, l'affidabilità e la tracciabilità delle informazioni e dei dati contenuti nello studio, nonché la correttezza dei calcoli eseguiti.

5.6 Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti

I dati raccolti sono stati analizzati mediante l'impiego del software SimaPro v.9.3.0.3 (Pré-Consultants). Inoltre, è stato selezionato il database EcoInvent 3.7.1 ed i dataset cut-off, per i dati di background relativi ai processi agricoli e agli impianti di conversione, ed il metodo EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019) per la valutazione degli impatti. Tale metodo, indicato dalla Commissione Europea per l'Environmental Footprint, comprende la caratterizzazione, la normalizzazione e ponderazione.

5.7 Informazioni ambientali aggiuntive

La biomassa solida, in Italia, costituisce una risorsa disponibile in grande quantità. Infatti, il quantitativo di biomassa forestale sfruttabile nel rispetto dell'ambiente è circa il triplo di quello attualmente utilizzato (Tosi, 2018).

Fra l'altro, la valorizzazione energetica dei residui forestali contribuisce alla manutenzione del patrimonio boschivo, che è in costante accrescimento, riducendo così il rischio idrogeologico e di incendi che distruggono e impoveriscono il territorio (Mattiaccio, 2019). Inoltre, l'impiego a fini energetici delle biomasse residue boschive e di origine agricola rappresenta una gestione sostenibile di tali rifiuti, che altrimenti sarebbero smaltiti in discarica o bruciati in modo incontrollato. Quindi, fra i vantaggi ambientali associati alla valorizzazione energetica delle biomasse, vanno considerati anche gli impatti evitati derivanti da pratiche scorrette e dannose. Per di più, dato che le biomasse, durante la combustione, rilasciano una quantità di anidride carbonica equivalente a quella precedentemente assorbita durante la loro crescita (carbon stock), rappresentano una fonte energetica meno impattante sull'ambiente rispetto alle risorse fossili.

Tuttavia, dalla filiera energetica delle biomasse solide si generano anche sostanze dannose per la salute umana e dell'ecosistema, come il particolato atmosferico. Per esempio, le particelle con un diametro inferiore a 2,5 micron (PM2,5) sono in grado di infiltrarsi nelle vie respiratorie e nei polmoni, causando problemi respiratori e aumentando il rischio di malattie cardiovascolari. In Italia, secondo una ricerca del progetto VIIAS (Valutazione Integrata dell'Impatto dell'Inquinamento atmosferico sull'Ambiente e sulla Salute) del Centro Controllo Malattie del Ministero della Salute, le PM 2,5 causano circa 30.000 decessi l'anno, pari al 7% di tutti i decessi (Apros, 2020). Inoltre, le particelle più grosse possono irritare le vie respiratorie e compromettere la qualità dell'aria, a livello locale.

Altre sostanze derivanti dalla combustione delle biomasse solide come, ad esempio, il monossido di carbonio (CO), gli ossidi di azoto (NOx) e i composti organici volatili (COV), oltre a contribuire all'inquinamento dell'aria, determinano un aumento dell'effetto serra. Infine, la combustione delle biomasse solide genera ceneri che possono contenere metalli pesanti e altri composti tossici e, pertanto, vanno gestite con cautela, al fine di evitare danni ambientali.

Tuttavia, è importante sottolineare che le emissioni inquinanti dipendono soprattutto dal tipo (dimensioni, tecnologia) di impianti e dalle misure da essi adottate per il trattamento dei fumi (Tosi, 2018).

Uno studio del CNR ha rivelato che gli impianti domestici (caldaie a pellet e classici caminetti), che in Italia sono più di 4 milioni (Mattiaccio, 2019), e i combustori di piccola taglia spesso non possiedono sistemi di controllo e contenimento delle emissioni e rappresentano un'importante fonte di inquinamento, arrivando a produrre emissioni di diversi ordini di grandezza superiori rispetto ad una combustione controllata. Per esempio, secondo uno studio dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), il 64% delle PM2,5 è generato dagli impianti domestici (Apros, 2020). Inoltre, l'Istituto "Inquinamento Atmosferico" del CNR ha osservato che la combustione di biomasse può risultare fino a 10000 volte più inquinante, se effettuata in impianti domestici tradizionali o all'aperto piuttosto che nei grandi impianti industriali. Tuttavia, gli impianti

domestici di ultima generazione, in cui la combustione è preceduta dalla gassificazione, sono caratterizzati da emissioni molto più contenute rispetto ai modelli più vecchi. Una ricerca dell'ENEA ha evidenziato che i nuovi generatori di calore, pur senza sistemi di abbattimento delle emissioni, presentano una diminuzione del 27% delle emissioni di PM10, rispetto alle stufe a legna tradizionali; inoltre, le emissioni delle stufe a pellet producono emissioni da 4 a 6 volte minori di quelle dei sistemi tradizionali (EBS, 2017).
Per quanto riguarda gli impianti con potenza elettrica superiore a 5 MWe, gli impatti ambientali sono ridotti grazie all'adozione di sistemi di abbattimento delle emissioni, come i filtri a maniche, i precipitatori elettrostatici, i sistemi di contenimento delle emissioni di monossido di carbonio e di abbattimento selettivo (per esempio, su catalizzatori) degli ossidi di azoto (EBS, 2017).
Pertanto, adottando pratiche sostenibili di gestione delle biomasse, sia in termini di produzione che di approvvigionamento, e tecnologie pulite, nel rispetto delle normative ambientali vigenti, è possibile sfruttare le biomasse solide come fonte energetica pulita e rinnovabile.

6 Modellazione dei dataset della filiera

I dataset della filiera di produzione di energia da biomasse solide, in Italia, sono stati modellati partendo dalle informazioni, riportate nel report del GSE (GSE, 2022), inerenti ai dati di produzione di energia elettrica da biomasse solide, relativi all'anno 2020. Secondo tale report, dei 6.800 GWh totali prodotti, 2.379,5 GWh (35%) provengono dalle biomasse da RSU, mentre 4.420,5 GWh (65%) provengono da altre biomasse (Tabella 1). Per "altre biomasse" si intendono le biomasse solide provenienti dai comparti forestale, agricolo ed agroindustriale. Come detto in precedenza, da questi comparti possono derivare sia biomasse residuali (scarti forestali, agricoli e dell'industria agroalimentare) che biomasse da colture dedicate (arboricoltura e Short Rotation Forestry). Dal momento che gli impianti italiani di produzione di energia elettrica, alimentati da altre biomasse, utilizzano biomasse residuali per il 95% (EBS, 2020), nel modello sono state considerate solo tali biomasse. Inoltre, per la conversione delle "altre biomasse" in energia elettrica, il modello prevede un pre-trattamento di cippatura (riduzione a scaglie di piccole dimensioni della biomassa originaria) definito sulla base dello studio di Scrucca et al., 2021 (Report Arcadia "Studio di filiera – Cippato forestale").
Pertanto, è stato creato un dataset relativo alla produzione di energia elettrica da altre biomasse solide (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass) ed uno relativo alla produzione di energia elettrica dalle biomasse degli RSU (Electricity from solid biomass_CL2_ biomass from MSW). Inoltre, è stato definito un terzo dataset, relativo alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide, in Italia (1kWh Electricity from solid biomass IT mix), combinando i due processi unitari CL1 (65%) e CL2 (35%), come illustrato in Tabella 10.

Tabella 10 Categorie di biomasse considerate e relativi processi unitari usati nella costruzione del dataset e corrispondente contributo percentuale alla produzione elettrica da biomasse solide in Italia.

Categoria di biomassa (e relativi processi unitari)	**Contributo percentuale alla produzione elettrica da biomasse solide in Italia**
Biomasse solide diverse da RSU (Processo unitario CL1 – Produzione di elettricità da biomasse solide diverse da RSU)	65%
Biomasse solide da RSU (Processo unitario CL2 - Produzione di elettricità da biomasse solide da RSU)	35%

Il modello considerato prevede l'impiego di impianti di combustione e cogenerazione, considerando la sola produzione di energia elettrica. Tuttavia, vista la crescente necessità di recuperare anche il calore prodotto, nel presente studio, è stata effettuata un'analisi di sensitività, valutando la possibilità di co-produrre e recuperare sia elettricità che calore.

7 Analisi di inventario

I dati di inventario raccolti sono relativi alla produzione di 1 kWh di elettricità da biomasse solide, in Italia (corrispondente all'unità funzionale).

Procedura di raccolta dei dati e carenze identificate per il processo relativo alla produzione di elettricità da altre biomasse solide (di provenienza diversa da RSU): Electricity from solid biomass_CL1_other biomass.

Per la costruzione degli inventari dei processi che generano energia elettrica, a partire da biomasse solide di origine diversa da RSU, sono stati utilizzati dati primari e dati secondari. In particolare, i dati primari sono stati forniti da aziende afferenti all'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS), costituita da 15 operatori (Associati) con 18 impianti, distribuiti su tutto il territorio nazionale. In tali impianti viene impiegato esclusivamente materiale residuale da filiera forestale, agro-industriale e agricola o scarti dell'industria di prima e seconda lavorazione del legno. In dettaglio, il 90% di tale biomassa è di provenienza locale (Enti Locali Online), mentre il restante 10% proviene in parte (8%) dall'Europa e in parte (2%) dall'America (USA e Canada) (FIPER, 2015). L'energia elettrica prodotta da tali aziende equivale al 50% dell'elettricità da biomasse solide in Italia.

In dettaglio, i dati raccolti dalle aziende EBS riguardano:

- Provenienza delle biomasse, tipologia di biocombustibile prodotto e consumi annui di biomassa.
- Consumi di acqua e rifiuti.
- Tipologia di combustione.
- Caratteristiche degli impianti di cogenerazione (es. potenza elettrica nominale, potenza termica recuperabile e autoconsumo dell'impianto).
- Sistemi di abbattimento dei fumi.
- Quantità di energia elettrica prodotta.
- Destinazione d'uso dell'energia elettrica generata.

In tutto, sono stati impiegati i dati di 14 aziende (aziende di riferimento), con una potenza elettrica compresa fra 0,99 e 46 MWe. Pertanto, gli impianti di tali aziende ricadono nella fascia di potenza 1-75 MWe che risulta essere rappresentativa di circa il 98%1 dell'elettricità da "altre biomasse solide", in Italia, in accordo con i dati del portale Atlaimpianti del GSE (https://www.gse.it/dati-e-scenari/atlaimpianti). Gran parte degli impianti delle aziende selezionate utilizza, come tipologia di combustione, una caldaia a griglia mobile o vibrante o a letto fluido per la produzione di vapore ad alta temperatura e pressione, connessa ad una turbina a vapore per la produzione di sola energia elettrica (motore cogenerativo, ma con dissipazione di calore). Infatti, nel ciclo caldaia/turbina a vapore, le biomasse vengono bruciate per produrre vapore ad alta pressione, che viene fatto espandere nelle turbine; ciascuna turbina è accoppiata ad un alternatore che converte l'energia cinetica in elettricità. La depurazione dei fumi avviene tramite filtro a maniche o elettrofiltro (sistemi di abbattimento).

[1] Si sottolinea che l'elettricità totale da "altre biomasse solide" è stata determinata considerando solo il 5% dell'energia elettrica prodotta dalla centrale Fiume Santo (SS) (https://www.epproduzione.com/it/impianti/fiume-santo), presente sul portale di Atlaimpianti. Infatti, in questo impianto, solo il 5% del combustibile è costituito da biomasse vegetali vergini, mentre il restante è rappresentato da carbone (Dichiarazione Ambientale Fiume Santo, 2021).

La percentuale media di autoconsumo elettrico è dell'11% (dato primario confermato dall'associazione EBS), mentre il surplus di elettricità prodotta viene venduto alla rete elettrica nazionale.
L'elaborazione dei dati da EBS è riportata nell'Allegato II.
Per quanto riguarda il pretrattamento di cippatura (processo di chipping), i dati sono stati tratti dallo studio condotto da Scrucca et al. 2021 (Report Arcadia "Studio di filiera – Cippato forestale").

Procedura di raccolta dei dati e carenze identificate per il processo relativo alla produzione di elettricità da biomasse solide provenienti da RSU: Electricity from solid biomass_CL2 _biomass from MSW.
Per la costruzione degli inventari dei processi che generano energia elettrica, a partire da biomasse solide da RSU, sono stati utilizzati dati relativi a 7 impianti di termovalorizzazione riportati sul portale di Atlaimpianti (https://www.gse.it/dati-e-scenari/atlaimpianti).
Nel dettaglio, i dati raccolti riguardano:

- consumi annui di biomassa;
- consumi di acqua;
- tipologia di combustione;
- caratteristiche degli impianti (es. potenza elettrica nominale e autoconsumo dell'impianto);
- quantità di energia elettrica prodotta e autoconsumata.

Siccome negli impianti di termovalorizzazione confluiscono tutti i rifiuti urbani (non solo quelli ascrivibili alle biomasse), l'energia da biomassa è stata considerata pari al 51% dell'energia elettrica totale prodotta dagli impianti di termovalorizzazione, in accordo col D.M. 06/07/2012.
Gli impianti selezionati ricadono nella fascia 1-70 MWe e rappresentano il 45% della produzione elettrica complessiva degli impianti alimentati da RSU (5.540.882.578 kWh, anno 2020). Il restante 55% proviene da un impianto di Venezia, con potenza elettrica nominale di 640000 kW (Atlaimpianti, 2020) che non è stato incluso nello studio, per mancanza di dati.
In linea generale, il termovalorizzatore è un impianto mediamente complesso, che permette lo smaltimento di rifiuti eterogenei attraverso la combustione (in forni di vario tipo) con la produzione di calore, che nella realtà italiana è utilizzato per produrre sola energia elettrica (attraverso turbine a vapore), mentre il resto del calore viene completamente dissipato. Particolarmente importante in questo tipo di impianti è la linea di pretrattamento dei rifiuti (che subiscono una lunga serie di trattamenti chimico-fisici per essere trasformati in materiale combustibile) e la parte di abbattimento degli inquinanti presenti nei fumi. Di solito è presente un sistema di abbattimento a secco, costituito da un sistema di dosaggio ad additivi di bicarbonato di sodio e carboni attivi, da un filtro a maniche e da un sistema catalitico. La percentuale di autoconsumo elettrico, calcolata come media sugli impianti presenti nello studio, è pari al 24%. L'energia elettrica prodotta da questi impianti (al netto di quella autoconsumata) è immessa nella rete elettrica nazionale.
L'elaborazione dei dati è riportata nell'Allegato II.

Elettricità prodotta ed autoconsumata
Sebbene nell'analisi LCA si faccia riferimento a 1 kWh di elettricità prodotta da biomasse solide, a puro titolo informativo, si riportano, in Tabella 11, i valori annuali totali, ceduti alla rete ed autoconsumati per l'elettricità da biomasse solide, riferiti ai processi unitari CL1 e CL2.
L'elettricità media annuale totale da biomasse solide, per il processo CL1 e CL2 (CL1: 1,76E+09 kWh, CL2: 5,94E+08 kWh), è stata ottenuta sommando i quantitativi annuali medi generati dalle rispettive aziende di riferimento.

Il dato sull'autoconsumo medio di elettricità per il processo CL1 è stato fornito da EBS ed è pari all'11%. Per la classe CL2, l'autoconsumo è stato calcolato come media dei dati delle aziende investigate ed è pari al 15%.
Pertanto, il valore della produzione netta di energia elettrica per ciascuna classe è: CL1: 1,57E+09 kWh; CL2: 5,03E+08 kWh.

Tabella 11 Calcoli dei flussi (lordi, netti e di autoconsumo) di energia elettrica (EE) per i processi CL1 e CL2.

Flusso	Processo CL1- EE da altre biomasse	Processo CL2- EE da biomassa da RSU
Elettricità lorda (kWh)	Somma dei quantitativi generati dalle 14 aziende di riferimento di EBS. TOT.: **1,76E+09**	Somma dei quantitativi generati dalle 7 aziende di riferimento. TOT.: **5,94E+08**
Elettricità netta/ceduta (kWh)	1,76E+09*0,89= **1,57E+09**	**5,94E+08***0,85= **5,03E+08**
Elettricità autoconsumata (kWh)	1,76E+09*0,11= **1,94E+08**	5,94E+08*0,15= **9,04+07**

7.1 Assunzioni utilizzate nello studio

In questo lavoro sono state fatte le seguenti assunzioni:

- Nei processi di combustione e cogenerazione investigati si assume che una parte dell'elettricità generata venga utilizzata all'interno degli stessi impianti (autoconsumo). In dettaglio, per gli impianti alimentati da biomasse residuali diverse da RSU ("altre biomasse"), il quantitativo di elettricità autoconsumato dai processi di conversione energetica è uguale all'11% dell'energia prodotta, sulla base dei dati forniti dall'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS). Nel caso di impianti che impiegano le biomasse da RSU, l'autoconsumo medio è stato calcolato sulla base dei dati primari di 7 impianti, ed è pari al 15% dell'energia prodotta.
- L'energia elettrica prodotta dalle biomasse da RSU è stata posta pari al 51% dell'Energia elettrica totale ottenuta da RSU, in accordo con il D.M. 06/07/2012.
- Le emissioni in aria prodotte dagli impianti di cogenerazione sono quelle riportate nel foglio di lavoro "non industrial" del file "EF combustion 2019" di ISPRA (ISPRA, 2019).
- Il calore è stato considerato completamente disperso, data l'impossibilità di reperire dati relativi al calore recuperato. Pertanto, il calore non è stato considerato come un coprodotto e, di conseguenza, non è stato necessario applicare procedure di allocazione.
- Nel modello per le altre biomasse (processo CL1, dove CL1 sta per Classe 1) sono state considerate solo le biomasse residuali, ritenendo trascurabile il contributo delle biomasse da colture dedicate. Infatti, gli impianti italiani di produzione di energia elettrica, alimentati da altre biomasse, utilizzano biomasse residuali per il 95% e colture dedicate soltanto per il 5% (EBS, 2020).
- Le biomasse residuali seguono un approccio "zero burden", ossia non è stato considerato il carico ambientale del processo che le ha generate (Ekvall et al., 2007).
- Per il trasporto, è stato condotto uno studio sulla provenienza delle biomasse solide utilizzate in Italia per la produzione di energia elettrica. In dettaglio, è stato verificato che il 90% è di origine italiana (Enti Locali Online) e il restante 10% di origine internazionale. In dettaglio, l'80% della biomassa estera proviene dall'Europa e, nel modello, viene trasportata

su gomma[2] (distanza internazionale media percorsa pari a 543 km[3]). Il restante 20% della biomassa di origine internazionale proviene da USA e Canada (FIPER, 2015) ed è stato ipotizzato che venga trasportata in parte attraverso mezzi navali (distanza media percorsa pari a 7458,5 km[4]) e in parte su gomma (distanza nazionale media percorsa pari a 125 km[3]). Per tutte le biomasse di origine italiana, la distanza di trasporto dal luogo di produzione delle biomasse all'impianto di conversione è posta pari a 70 km, in accordo con quanto previsto dalla normativa per la filiera corta per le biomasse a fini energetici (DM 2/3/2010).

7.2 Descrizione e documentazione processi unitari

In questo studio sono stati definiti due processi unitari, relativi alla produzione di elettricità da biomasse solide:

- CL1: produzione di elettricità da "altre biomasse solide" (di origine diversa da RSU);
- CL2: produzione di elettricità dalle biomasse solide dagli RSU.

Calcolo dei flussi relativi ai seguenti processi:

Biomasse residuali

Nel caso del processo CL1, il valore della biomassa media per kWh (1,49E-03 ton/kWh) è stato determinato utilizzando il dato fornito da EBS, relativo alla quantità media annuale di biomassa impiegata dalle aziende associate, e l'elettricità complessiva prodotta dalle 14 aziende incluse nell'analisi.

Per il processo CL2, la biomassa media per kWh (1,33E-03 ton/kWh) è stata calcolata a partire dai quantitativi impiegati nei 7 impianti selezionati.

Tali biomasse sono contemplate nei rispettivi processi unitari, attraverso il processo "Residual Biomass", che segue un approccio "zero burden" (Clift et al.,2000; Ekvall et al.,2007; Nakatani, 2014), visto che le biomasse considerate sono tutte di natura residuale.

Trasporto

Il flusso del processo di trasporto è stato definito in funzione della quantità di biomassa trasportata e della distanza percorsa (tkm).

In dettaglio, per le biomasse di origine nazionale (che costituiscono il 90% per la classe CL1 e il 100% della classe CL2), la distanza media, fra il punto di raccolta della biomassa e l'impianto di conversione energetica, è stata ipotizzata pari a 70 km, in accordo con il DM 02/03/2010.

Nel caso del processo CL1, per il restante 10% della biomassa totale utilizzata, il flusso del trasporto è stato stimato come segue (maggiori dettagli sul trasporto sono riportate nell'Allegato I):

- per l'8% della biomassa (proveniente dall'Europa), è stato considerato un trasporto su gomma, considerando la distanza media europea che è pari a 543 km (http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#);
- per il 2% della biomassa (proveniente da USA e Canada) è stato considerato un trasporto via mare, per un distanza media di 7458,5 km (https://www.searates.com/services/distances-time/), e poi su gomma, per la distanza media nazionale che è pari a 125 km (http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#).

[2] https://www.istat.it/storage/ASI/2021/capitoli/C20.pdf

[3] http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#

[4] https://www.searates.com/services/distances-time/

Emissioni dal cogeneratore

Le emissioni dal cogeneratore sono state ottenute dal documento EF combustion 2019 di ISPRA (ISPRA, 2019), foglio di lavoro "Non industrial". In particolare, per il processo CL1, è stata fatta una media tra:

- i valori corrispondenti alle emissioni associate alla produzione di energia da biomasse solide, in impianti di combustione con potenza inferiore a 50 MW, impiegati nel settore agricolo-forestale (ISPRA, 2019 - riportati alla riga 42),
- i valori corrispondenti alle emissioni associate alla produzione di energia da legno e similari, in impianti di combustione con potenza inferiore a 50 MW, impiegati nel settore commerciale e istituzionale (ISPRA, 2019 - riportati alla riga 6).

Per il processo CL2, sono stati impiegati i valori i corrispondenti alle emissioni in aria associate alla produzione di energia da rifiuti municipali e biomasse, in impianti di combustione commerciali e istituzionali nonché in impianti residenziali, con potenza inferiore a 50 MW (ISPRA, 2019 - riportati alle righe 8 e 26). Per le emissioni in acqua, invece, si è fatto riferimento al processo del database EcoInvent v. 3.7.1 (*Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U).*

I valori, nel documento originale, sono riportati in kg/GJ (CO_2, CH_4, N_2O, NO_x, CO, NMVOC) o in g/GJ (PM10, PM2.5, Black carbon – BC, PAH, Benzo[α]pyrene, Benzo[ß]fluoranthene, Benzo[κ]fluoranthene, Indeno[1,2,3-cd]pyrene, PCB, HBC, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn), o in µg/GJ (Diox) e sono stati convertiti in g/kWh, basandosi sull'equivalenza 1 GJ = 277,78 kWh.

In Tabella 12, sono riportati i valori delle emissioni in kg/GJ e in kg/kWh per il processo CL1. In Tabella 13, invece, sono riportati i valori delle emissioni per il processo CL2.

Tabella 12 Emissioni prodotte dal cogeneratore, durante la produzione di elettricità, classe CL1

U.M.	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**	**NO_x**	**CO**	**NMVOC**	**SO_2**	**NH_3**
kg/GJ	9,46E+01	3,20E-01	1,40E-02	6,58E-02	4,63E+00	5,35E-01	1,40E-02	4,83E-03
g/kWh	3,41E+02	1,15E+00	5,04E-02	2,37E-01	1,67E+01	1,93E+00	5,03E-02	1,74E-02
U.M.	**PM10**	**PM2.5**	**BC**	**PAH**	**Benzo[α]pyrene**	**Benzo[ß]fluoranthene**	**Benzo[κ]fluoranthene**	**Indeno[1,2,3-cd]pyrene**
g/GJ	3,32E+02	3,30E+02	3,13E+01	1,93E-01	5,83E-02	6,65E-02	2,99E-02	3,81E-02
g/kWh	1,19E+00	1,19E+00	1,13E-01	6,94E-04	2,10E-04	2,39E-04	1,07E-04	1,37E-04
U.M.	**Diox**	**PCB**	**HCB**	**As**	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**
g/GJ	3,68E-07	5,91E-05	5,91E-06	2,46E-04	5,46E-03	1,69E-03	7,44E-03	5,00E-03
g/kWh	1,33E-09	2,13E-07	2,13E-08	8,87E-07	1,96E-05	6,07E-06	2,68E-05	1,80E-05
U.M.	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Zn**				
g/GJ	9,86E-04	1,94E-02	2,46E-04	1,41E-01				
g/kWh	3,55E-06	6,97E-05	8,87E-07	5,07E-04				

Tabella 13 Emissioni prodotte dal cogeneratore, durante la produzione di elettricità, classe CL2

U.M.	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**
kg/GJ	8,25E+01	5,28E-03	8,82E-03
g/kWh	2,97E+02	1,90E-02	3,18E-02

Descrizione dei processi costruiti:

Cogeneratore

Per CL1, il processo di cogenerazione, per la produzione di 1 kWh di elettricità, è stato modellato a partire dal processo di EcoInvent "*Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U",* dal quale sono stati eliminati gli input di wood chips (sostituiti dalle biomasse residuali), le emissioni (sostituite con dati primari, di seguito dettagliati) e il trattamento dei rifiuti. Il nuovo processo, così ottenuto, è stato rinominato "ARCADIA - *Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U".*

Per CL2, il processo di cogenerazione, per la produzione di 1 kWh di elettricità, è stato costruito a partire dal processo di EcoInvent "*Biowaste {GLO}|treatment of biowaste, municipal incineration | Cut-off, U*", dal quale sono state eliminate le emissioni in aria (sostituite con dati primari, di seguito dettagliati), lasciando invece inalterati le emissioni in acqua e i rifiuti. Il nuovo processo, così ottenuto, è stato rinominato "*ARCADIA - Biowaste {GLO}|treatment of biowaste, municipal incineration | Cut-off, U*".

Inventario- LCI

I flussi di riferimento per i processi CL1 e CL2 (Tabella 14) sono riferititi all'unità funzionale di riferimento (1 kWh di energia elettrica da biomasse solide).

Tabella 14 Inventari dei processi unitari CL1 e CL2, riferiti alla produzione di 1 kWh elettrico (FU).

Processo CL1- EE da altre biomasse			
Flussi/processi in input	Valore	Unità di misura	Dataset di riferimento
INPUT			
Residual biomass	1,49E-03	ton	Quantità di biomassa: EBS (dato primario). *Questo processo ha seguito l'approccio "zero burden".*
*ARCADIA_ Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014	Cut-off, U*	1,00E+00	kWh	Processo di produzione dell'elettricità: adattato da EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario) privo del quantitativo di wood chips, delle emissioni e del trattamento dei rifiuti.
Water, cooling , unspecified natural origin, IT	1,62E-03	m^3	Quantità di acqua: EBS (dato primario).
Chipping	1,49E-03	ton	Processo di trasformazione della biomassa: basato sulle informazioni riportate

			in Scrucca et al. 2021 (Report Arcadia "Studio di filiera – Cippato forestale) (dato secondario).
Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U	9,39E-02	tkm	Processo di trasporto: EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario).
			Quantità di biomassa trasportata: EBS (dato primario), 90% della biomassa totale (1.34 E-03 ton).
			Distanza percorsa: DM 2/3/2010 (70 km) (dato secondario).
Transport freight, sea, container ship{GLO}|market for transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U	2,22E-01	tkm	Processo di trasporto: EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario).
			Quantità di biomassa trasportata: EBS (dato primario), 2% della biomassa totale (2.98E-05 ton).
			Distanza percorsa: trasporto in nave da USA e CANADA. (dato calcolato: 7458,5 km).
Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U	3,73E-03	tkm	Processo di trasporto: EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario).
			Quantità di biomassa trasportata: EBS (dato primario), 2% della biomassa totale (2.98E-05 ton) da USA e Canada.
			Distanza percorsa: trasporto su gomma (camion) su distanza nazionale (125 km).
Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U	6,47E-02	tkm	Processo di trasporto: EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario).
			Quantità di biomassa trasportata: EBS (dato primario), 8% della biomassa totale

			(1.19E-04 ton) di provenienza europea.
			Distanza percorsa: trasporto su gomma (camion) distanza media europea (543 km).
Output			
Output verso la tecnosfera: prodotti			
Electricity from solid biomass_CL1 _other biomass	1,00E+00	kWh	
Output verso la tecnosfera: trattamento dei rifiuti			
Wastewater, unpolluted (CH)|market for wastewater, unpolluted| Cut-off	8,25E-04	m^3	Quantità di acqua: EBS (dato primario)
Hazardous waste, for underground deposit (RER)|market for hazardous waste, for underground deposit |Cut-off, U	8,73E-08	ton	Quantità di rifiuti pericolosi: EBS (dato primario)
Inert waste (Europe without Switzerland)|treatment of inert waste, sanitary landfill |Cut-off, U	6,71E-07	ton	Quantità di rifiuti non pericolosi: EBS (dato primario)
Emissioni in aria			
Methane, biogenic	1,15	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Carbon dioxide, biogenic	3,41E+02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Dinitrogen monoxide	5,00E-02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Nitrogen oxides, IT	2,40E-01	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Carbon monoxide, biogenic	1,67E+01	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	1,93E+00	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)

Sulfur dioxide, IT	5,03E-02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Ammonia, IT	1,74E-02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Particulates, < 10 um	1,19E+00	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Particulates, < 2.5 um	1,19E+00	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Particulates, < 2.5 um	1,13E-01	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario) Questo flusso si riferisce al Carbon Black
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	7,00E-04	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Benzo[a]pyrene	2,10E-04	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Benzo[ß]fluoranthene	2,39E-04	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Benzo[κ]fluoranthene	1,07E-04	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	1,37E-04	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Dioxin,2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	1,33E-09	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Polychlorinated biphenyls	2,13E-07	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Benzene, hexachloro-	2,13E-08	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Cadmium	1,96E-05	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Copper	2,68E-05	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)

Mercury	1,80E-05	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Lead	6,97E-05	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Zinc	5,07E-04	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Arsenic	8,87E-07	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Chromium	6,07E-06	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Nickel	3,55E-06	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Selenium	8,87E-07	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Processo CL2- EE da biomassa da RSU			
Flussi/processi in input	**Valore**	**Unità di misura**	**Dataset di riferimento**
INPUT			
Residual biomass	1,33E-03	ton	Quantità di biomassa: dato primario.
			Questo processo ha seguito l'approccio "zero burden".
ARCADIA – Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U	1,33E-03	ton	Processo di produzione dell'elettricità: adattato da EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario) privo delle emissioni in aria.
Water, cooling , unspecified natural origin, IT	1,87E-03	m^3	Quantità di acqua: dato primario
Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U	9,31E-02	tkm	Processo di trasporto: EcoInvent v. 3.7.1 (dato secondario).
			Quantità di biomassa trasportata: dato primario (1,33E-3 ton).

			Distanza percorsa: DM 2/3/2010 (70 km) (dato secondario).
OUTPUT			
Output verso la tecnosfera: prodotto			
Electricity from solid biomass_CL2_ biomass from MSW	1,00E+00	kWh	
Emissioni in aria			
Methane, biogenic	1,90E-02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Carbon dioxide, biogenic	2,97E+02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)
Dinitrogen monoxide	3,18E-02	g	Fonte: ISPRA (ISPRA, 2019) (Dato secondario)

7.3 Sviluppo dei datasets

Nel presente studio sono stati sviluppati i dataset, riportati in Tabella 15, relativi alla produzione di energia da biomasse solide in Italia. Tali dataset sono stati individuati sulla base del potenziale interesse da parte degli utenti della BDILCA e, per il loro sviluppo, sono stati utilizzati dati, sia primari che secondari, caratterizzati da un'elevata rappresentatività del contesto nazionale. Tutti i dettagli (metadati e impatti), relativi a ciascun dataset, sono riportati nell'Allegato IV.

Tabella 15 Dataset per la produzione di energia da biomasse solide in Italia.

Dataset	Descrizione
Processo CL1	Produzione di energia elettrica da biomasse solide diverse dai Rifiuti Solidi Urbani (RSU), ovvero biomasse di origine forestale, agroalimentare e agro-industriale. Nome del dataset nella Banca Dati Italiana LCA (BDILCA): "Electricity from solid biomass_CL1_other biomass" In questo dataset il processo di produzione dell'elettricità (ARCADIA_ *Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U*) è stato adattato dal processo di EcoInvent v. 3.7.1 "*_Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U*", privandolo del quantitativo di wood chips, delle emissioni e del trattamento dei rifiuti. Infatti, per il quantitativo di wood chips è stato usato il dato primario fornito da EBS (con un approccio zero burden); le emissioni sono state ottenute da ISPRA (2019) e per il trattamento dei rifiuti sono stati usati processi specifici per ciascuna tipologia di rifiuto individuato.
Processo CL2	Produzione di energia elettrica da biomasse da RSU. Nome del dataset nella BDILCA: "Electricity from solid biomass_CL2_ biomass from MSW". In questo dataset, il processo di produzione dell'elettricità (ARCADIA_ *Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U*) è stato adattato dal processo di EcoInvent v. 3.7.1 "*Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U",* privandolo delle emissioni in aria. Infatti, per le emissioni sono stati usati i dati di ISPRA (2019).
Processo di produzione di 1 kWh	Produzione di 1 kWh di energia elettrica da biomasse solide in Italia. Questo dataset è ottenuto dalla combinazione dei processi CL1 (65%) e CL2 (35%). Nome del dataset nella BDILCA: "1kWh Electricity from solid biomass IT mix"

8 Valutazione degli impatti ambientali

l presente studio intende fornire una valutazione, in accordo con le norme ISO 14040-44/2006, degli impatti ambientali potenziali della filiera di produzione di energia elettrica da biomasse solide in Italia. L'analisi si è basata sull'identificazione e la quantificazione di tutti i flussi in input e output associati alla fase di approvvigionamento della biomassa, incluso il trasporto dai punti di produzione degli scarti fino agli impianti di pretrattamento e conversione, e alla fase di trasformazione della biomassa in energia elettrica. Le emissioni locali sono state introdotte nel modello a partire dai dati riportati nel database EF_combustion_2019 reso disponibile da ISPRA (http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-le-sorgenti-di-combustione-stazionarie-in-italia/view). I dati raccolti sono stati analizzati mediante l'impiego del software SimaPro 9.3.0.3 sulla base del metodo EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019).
Nella Tabella 16 sono riportate le abbreviazioni usate per ciascuna categoria d'impatto con le relative unità di misura.

Tabella 16 Categorie d'impatto esaminate nel presente studio con le relative unità di misura e abbreviazioni

Impact category	Unit	Abbreviation
Climate change	kg CO_2 eq	CC
Ozone depletion	kg CFC11 eq	OD
Ionising radiation	kBq U-235 eq	IR
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	POD
Particulate matter	disease inc.	PM
Human toxicity, non-cancer	CTUh	HTnon-c
Human toxicity, cancer	CTUh	HTc
Acidification	mol H+ eq	AC
Eutrophication, freshwater	kg P eq	EUf
Eutrophication, marine	kg N eq	EUm
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	EUt
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	ECT
Land use	Pt	LU
Water use	m^3 depriv.	WU
Resource use, fossils	MJ	RDf
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	RDm
Climate change - Fossil	kg CO_2 eq	CCf
Climate change - Biogenic	kg CO_2 eq	CCb
Climate change - Land use and LU change	kg CO_2 eq	CClu
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	HTnon-c-o
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	HTnon-c-i
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	HTnon-c-m
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	HTc-o
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	HTc-i
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	HTc-m
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	ECT-o
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	ECT-i
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	ECT-m

8.1 Caratterizzazione

Gli impatti relativi alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia sono riportati in Figura 13 e in Tabella 17. I risultati mostrano un impatto maggiore generato dal processo CL1, che contribuisce per il 65% alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide; in particolare, la CL1 supera la CL2 per tutte le categorie d'impatto, fatta eccezione per Euf (93% CL2, 7% CL1), ECT (74% CL2, 26% CL1), HTC-m (51% CL2, 49% CL1), ECT-i (87% CL2, 13% CL1) e ECT-m (67% CL2, 33% CL1).

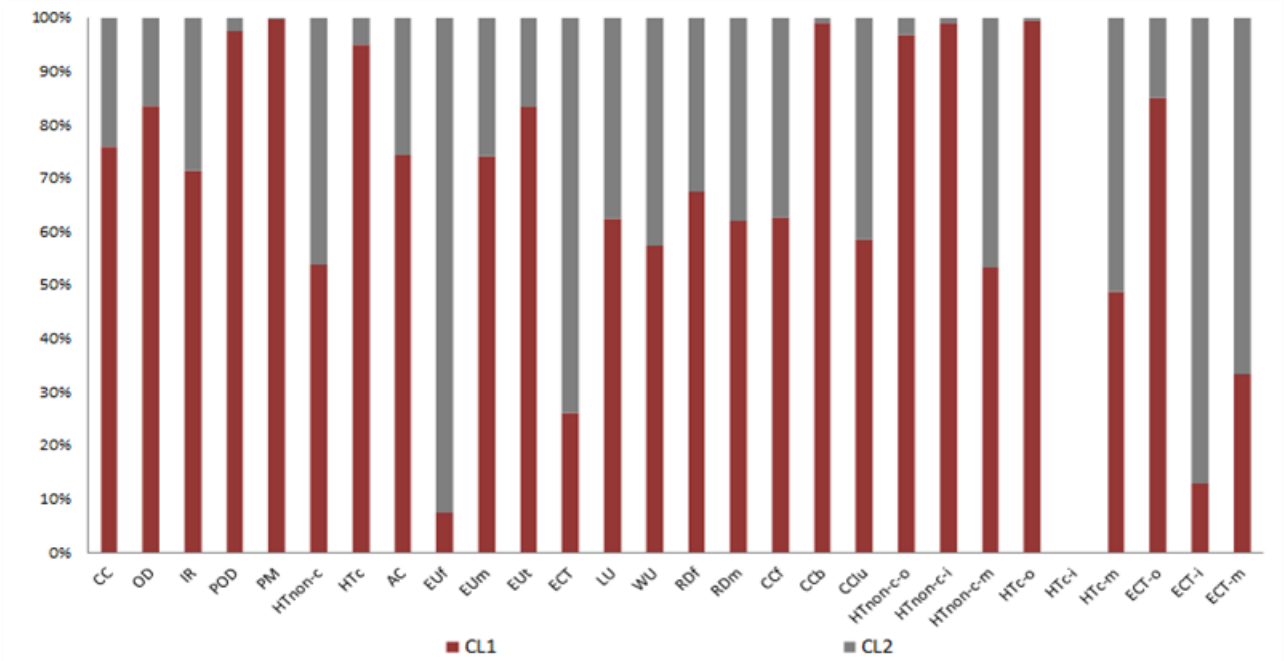


Figura 13 Contributo percentuale di ciascun processo agli impatti (caratterizzati), associati alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia.

Tabella 17 Impatti caratterizzati calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia (unità funzionale): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun processo.

Categorie d'impatto	Unità	Total	CL1	CL2
CC	kg CO_2 eq	7,10E-02	5,38E-02	1,71E-02
OD	kg CFC11 eq	1,16E-08	9,69E-09	1,90E-09
IR	kBq U-235 eq	2,17E-03	1,55E-03	6,19E-04
POD	kg NMVOC eq	1,53E-03	1,49E-03	3,79E-05
PM	disease inc.	2,47E-07	2,46E-07	6,34E-10
HTnon-c	CTUh	3,72E-09	2,00E-09	1,71E-09
HTc	CTUh	8,88E-10	8,45E-10	4,39E-11
AC	mol H+ eq	1,68E-04	1,25E-04	4,33E-05
EUf	kg P eq	2,46E-05	1,84E-06	2,28E-05
EUm	kg N eq	1,13E-04	8,34E-05	2,91E-05
EUt	mol N eq	7,16E-04	5,97E-04	1,19E-04
ECT	CTUe	1,07E+00	2,79E-01	7,90E-01
LU	Pt	3,43E-01	2,14E-01	1,29E-01
WU	m^3 depriv.	8,56E-02	4,91E-02	3,65E-02
RDf	MJ	4,77E-01	3,23E-01	1,55E-01
RDm	kg Sb eq	1,13E-07	7,02E-08	4,28E-08
CCf	kg CO_2 eq	4,52E-02	2,83E-02	1,69E-02
CCb	kg CO_2 eq	2,57E-02	2,55E-02	2,50E-04
CClu	kg CO_2 eq	1,03E-05	6,04E-06	4,27E-06
HTnon-c-o	CTUh	1,26E-10	1,22E-10	4,06E-12
HTnon-c-i	CTUh	1,19E-08	1,18E-08	1,05E-10
HTnon-c-m	CTUh	3,44E-09	1,83E-09	1,61E-09
HTc-o	CTUh	8,12E-10	8,07E-10	4,75E-12
HTc-i	CTUh	0,00	0,00	0,00
HTc-m	CTUh	7,63E-11	3,72E-11	3,91E-11
ECT-o	CTUe	3,49E-02	2,97E-02	5,24E-03
ECT-i	CTUe	4,69E-01	6,08E-02	4,08E-01
ECT-m	CTUe	5,64E-01	1,88E-01	3,76E-01

In dettaglio (Figura 14, Tabella 18), l'analisi ha mostrato che nella CL1 le emissioni locali rappresentano la parte più impattante, con un intervallo che va dallo 0% in OD, IR, Euf, LU, RDf, RDm e Cclu fino a superare il 90% in POD, HTnon-C, HTC, WU, HTnon-c-o, Htnon-c-m e HTc-o, fino a raggiungere il 100% degli impatti in PM, CCb, Htnon-c-i (con un valore medio su tutte le categorie di impatto del 48%). A seguire l'impatto maggiore è determinato dalla fase di trasporto della biomassa (con un intervallo che va dallo 0% in PM, CCb, HTnon-c-i e HTc-o fino a raggiungere l'81% degli impatti in LU, con un valore medio su tutte le categorie investigate del 26%), e poi dall'impiantistica (con un impatto che va dallo 0% in PM, HTc, CCb, HTnon-c-i e HTc-o, fino a raggiungere il 60% in RDm, con un valore medio su tutte le categorie investigate del 16%). Il processo di cippatura genera impatti tra 0% (in 8 categorie) e 36% (in RDf), con un valore medio su tutte le categorie investigate del 9%, mentre gli impatti relativi allo smaltimento di rifiuti (acque di scarico e rifiuti pericolosi e non pericolosi) possono considerarsi trascurabili (minori dell'1%). La biomassa residua non genera impatti, dato l'approccio "zero burden" adottato.

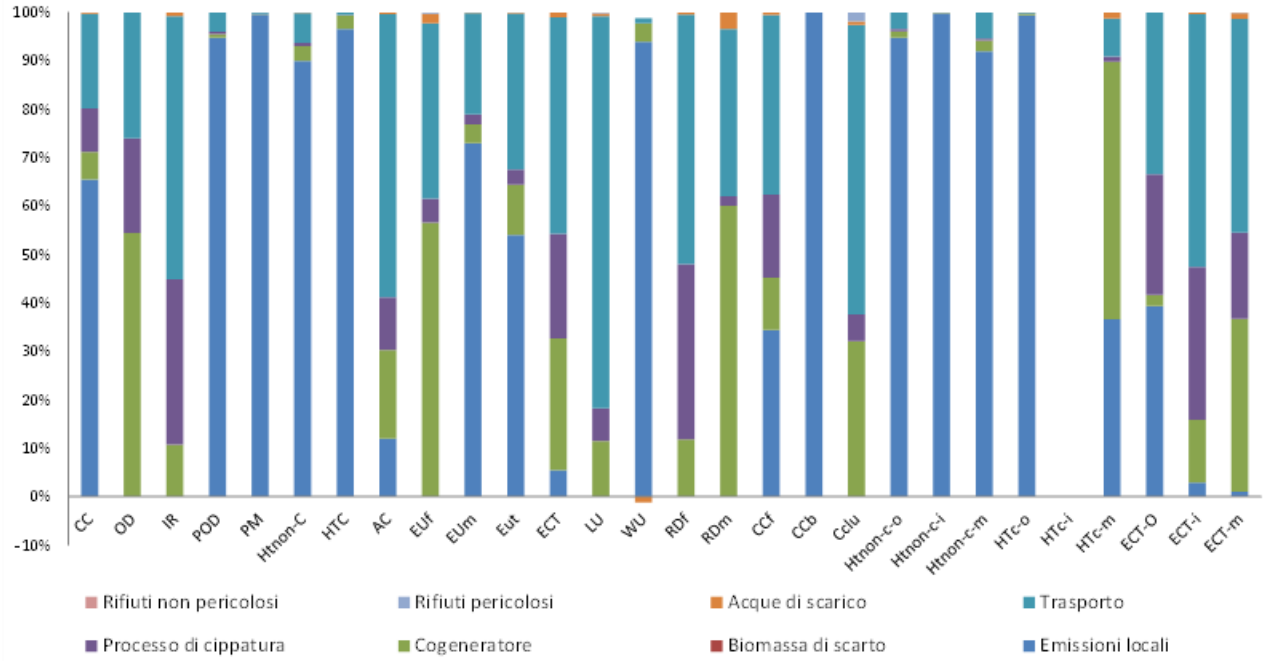


Figura 14 Contributo percentuale di ciascun flusso di input/output agli impatti (caratterizzati) del processo CL1 (EE da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU)

Tabella 18 Impatti caratterizzati, calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide di provenienza diversa da RSU ("altre biomasse"), in Italia (CL1): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output

Categorie d'impatto	Unità	Totale	Emissioni locali	Biomassa di scarto	Cogeneratore	Processo di cippatura	Trasporto	Acque di scarico	Rifiuti pericolosi	Rifiuti non pericolosi
CC	kg CO_2 eq	8,28E-02	5,42E-02	0,00	4,71E-03	7,46E-03	1,62E-02	2,35E-04	1,91E-05	7,06E-06
OD	kg CFC11 eq	1,49E-08	0,00	0,00	8,11E-09	2,91E-09	3,87E-09	9,89E-12	1,06E-12	2,18E-12
IR	kBq U-235 eq	2,39E-03	0,00	0,00	2,57E-04	8,15E-04	1,30E-03	1,69E-05	6,87E-07	7,85E-07
POD	kg NMVOC eq	2,30E-03	2,18E-03	0,00	1,74E-05	1,18E-05	9,13E-05	6,80E-07	9,04E-08	6,47E-08
PM	disease inc.	3,78E-07	3,76E-07	0,00	3,72E-10	1,07E-10	1,29E-09	1,29E-11	1,38E-12	1,15E-12
HTnon-c	CTUh	3,08E-09	2,77E-09	0,00	9,31E-11	2,02E-11	1,91E-10	3,58E-12	3,54E-13	7,24E-14
HTc	CTUh	1,30E-09	1,26E-09	0,00	3,57E-11	8,48E-13	6,76E-12	8,91E-13	9,39E-14	5,44E-15
AC	mol H+ eq	1,92E-04	2,30E-05	0,00	3,52E-05	2,10E-05	1,12E-04	7,48E-07	7,93E-08	5,94E-08
EUf	kg P eq	2,83E-06	0,00	0,00	1,60E-06	1,41E-07	1,02E-06	5,48E-08	7,79E-09	2,07E-09
EUm	kg N eq	1,28E-04	9,37E-05	0,00	4,98E-06	2,62E-06	2,68E-05	1,98E-07	1,97E-08	2,06E-08
EUt	mol N eq	9,19E-04	4,96E-04	0,00	9,59E-05	2,86E-05	2,96E-04	2,10E-06	1,98E-07	2,24E-07
ECT	CTUe	4,29E-01	2,36E-02	0,00	1,17E-01	9,25E-02	1,92E-01	3,89E-03	4,25E-04	1,17E-04
LU	Pt	3,29E-01	0,00	0,00	3,78E-02	2,23E-02	2,66E-01	1,74E-03	4,75E-04	3,98E-04
WU	m^3 depriv.	7,55E-02	7,27E-02	0,00	2,93E-03	1,75E-05	7,98E-04	-9,54E-04	3,92E-06	7,21E-06
RDf	MJ	4,96E-01	0,00	0,00	5,88E-02	1,79E-01	2,56E-01	2,00E-03	2,11E-04	1,66E-04
RDm	kg Sb eq	1,08E-07	0,00	0,00	6,49E-08	2,18E-09	3,72E-08	3,73E-09	3,62E-11	2,31E-11
CCf	kg CO_2 eq	4,36E-02	1,50E-02	0,00	4,70E-03	7,46E-03	1,62E-02	2,35E-04	1,89E-05	7,04E-06
CCb	kg CO_2 eq	3,92E-02	3,92E-02	0,00	7,99E-06	1,21E-06	5,48E-06	2,04E-07	1,46E-08	2,54E-08
CClu	kg CO_2 eq	9,29E-06	0,00	0,00	2,98E-06	5,20E-07	5,55E-06	7,55E-08	1,68E-07	3,07E-09
HTnon-c-o	CTUh	1,87E-10	1,77E-10	0,00	2,43E-12	8,94E-13	6,41E-12	1,25E-13	7,20E-15	2,72E-15
HTnon-c-i	CTUh	1,81E-08	1,80E-08	0,00	2,87E-11	7,41E-12	3,53E-11	9,30E-13	2,53E-13	3,61E-14
HTnon-c-m	CTUh	2,82E-09	2,59E-09	0,00	6,25E-11	1,21E-11	1,50E-10	2,55E-12	9,68E-14	3,42E-14
HTc-o	CTUh	1,24E-09	1,23E-09	0,00	5,29E-12	2,54E-13	2,29E-12	1,79E-13	6,71E-14	1,72E-15
HTc-i	CTUh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HTc-m	CTUh	5,72E-11	2,10E-11	0,00	3,04E-11	5,94E-13	4,48E-12	7,12E-13	2,68E-14	3,72E-15
ECT-o	CTUe	4,57E-02	1,80E-02	0,00	1,06E-03	1,14E-02	1,52E-02	3,53E-05	5,40E-06	8,51E-06
ECT-i	CTUe	9,36E-02	2,72E-03	0,00	1,21E-02	2,96E-02	4,88E-02	3,69E-04	2,82E-05	2,58E-05
ECT-m	CTUe	2,90E-01	2,88E-03	0,00	1,04E-01	5,15E-02	1,28E-01	3,48E-03	3,92E-04	8,27E-05

In Figura 15 e in Tabella 19, sono riportati gli impatti caratterizzati per il processo CL2. I risultati della caratterizzazione mostrano che l'impiantistica è l'input più impattante (con un intervallo che va dal 9% in CCb fino a raggiungere il 99% degli impatti in Euf, con un valore medio su tutte le categorie investigate del 75%).

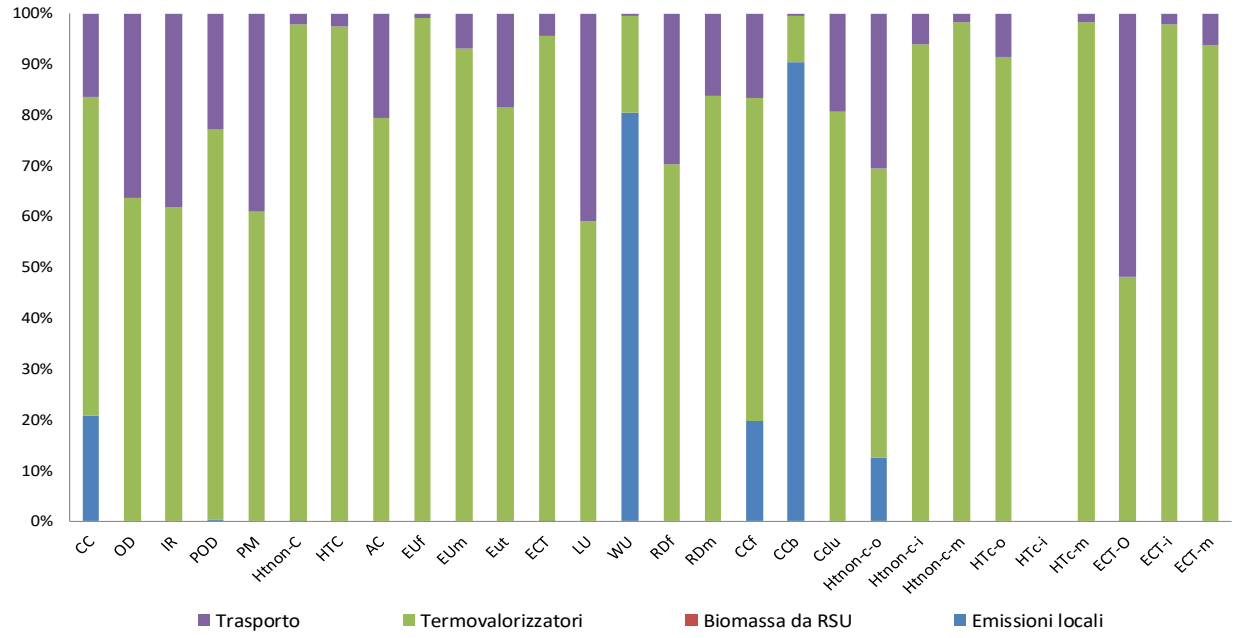


Figura 15 Contributo percentuale di ciascun flusso di input/output agli impatti (caratterizzati) del processo CL2 (EE da biomasse da RSU)

Sebbene generino un impatto medio su tutte le categorie investigate dell'8%, le emissioni locali contribuiscono per il 90% alla categoria CCb e per l'81% alla categoria WU. Infine, il trasporto, con un impatto medio su tutte le categorie investigate del 16%, raggiunge il 52% degli impatti totali solo nella categoria ECT-o. Anche in questo caso, le biomasse da RSU seguono l'approccio "zero burden" e non generano impatti.

Tabella 19 Impatti caratterizzati calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide da RSU, in Italia (CL2): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output

Categorie d'impatto	Unità	Totale	Emissioni locali	Biomassa da RSU	Termovalorizzatori	Trasporto
CC	kg CO_2 eq	4,90E-02	1,02E-02	0,00E+00	3,07E-02	8,08E-03
OD	kg CFC11 eq	5,44E-09	0,00E+00	0,00E+00	3,46E-09	1,98E-09
IR	kBq U-235 eq	1,77E-03	0,00E+00	0,00E+00	1,09E-03	6,75E-04
POD	kg NMVOC eq	1,08E-04	1,92E-07	0,00E+00	8,33E-05	2,48E-05
PM	disease inc.	1,81E-09	0,00E+00	0,00E+00	1,11E-09	7,06E-10
HTnon-c	CTUh	4,90E-09	1,44E-12	0,00E+00	4,79E-09	1,04E-10
HTc	CTUh	1,25E-10	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-10	3,08E-12
AC	mol H+ eq	1,24E-04	0,00E+00	0,00E+00	9,82E-05	2,54E-05
EUf	kg P eq	6,52E-05	0,00E+00	0,00E+00	6,46E-05	5,49E-07
EUm	kg N eq	8,33E-05	0,00E+00	0,00E+00	7,75E-05	5,79E-06
EUt	mol N eq	3,40E-04	0,00E+00	0,00E+00	2,77E-04	6,31E-05
ECT	CTUe	2,26E+00	6,08E-06	0,00E+00	2,16E+00	1,01E-01
LU	Pt	3,68E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,17E-01	1,51E-01
WU	m^3 depriv.	1,04E-01	8,40E-02	0,00E+00	1,99E-02	4,33E-04
RDf	MJ	4,42E-01	0,00E+00	0,00E+00	3,10E-01	1,31E-01
RDm	kg Sb eq	1,22E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,02E-07	1,98E-08
CCf	kg CO_2 eq	4,83E-02	9,54E-03	0,00E+00	3,06E-02	8,08E-03
CCb	kg CO_2 eq	7,15E-04	6,46E-04	0,00E+00	6,64E-05	2,86E-06
CClu	kg CO_2 eq	1,22E-05	0,00E+00	0,00E+00	9,85E-06	2,35E-06
HTnon-c-o	CTUh	1,16E-11	1,44E-12	0,00E+00	6,63E-12	3,54E-12
HTnon-c-i	CTUh	3,01E-10	0,00E+00	0,00E+00	2,82E-10	1,82E-11
HTnon-c-m	CTUh	4,59E-09	0,00E+00	0,00E+00	4,51E-09	8,25E-11
HTc-o	CTUh	1,36E-11	0,00E+00	0,00E+00	1,24E-11	1,17E-12
HTc-i	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HTc-m	CTUh	1,12E-10	0,00E+00	0,00E+00	1,10E-10	1,91E-12
ECT-o	CTUe	1,50E-02	6,08E-06	0,00E+00	7,21E-03	7,76E-03
ECT-i	CTUe	1,17E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E+00	2,54E-02
ECT-m	CTUe	1,07E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,01E+00	6,77E-02

8.2 Normalizzazione

In Figura 16 ed in Tabella 20, sono riportati i risultati della normalizzazione per la produzione di un 1 kWh di elettricità da biomasse solide in Italia, a cui contribuisce per il 65% l'energia elettrica prodotta da biomasse residuali che hanno provenienza diversa da RSU (CL1) e per il 35% l'energia elettrica prodotta da biomasse da RSU (CL2).

Si evidenzia che, a seguito della mancanza, nel metodo LCIA adottato, dei relativi fattori di pesatura, sono state escluse, dalle tabelle e dalle figure, le seguenti categorie di impatto: CCf, CCb, CClu, HTnon-c-o, HTnon-c-i, HTnon-c-m, HTc-o, HTc-i, HTc-m, ECT-o, ECT-i e ECT-m.

La categoria più impattata è la Particulate Matter (PM), con un valore di impatto normalizzato di 4,14E-4, al quale contribuisce esclusivamente il processo CL1. Impatti normalizzati rilevanti sono

riscontrati anche per la categoria Human toxicity, cancer - HTc (5,26E-05) e per la categoria Photochemical ozone formation - POD (3,78E-05), per le quali il processo CL1 contribuisce per il 95% e 98%, rispettivamente.

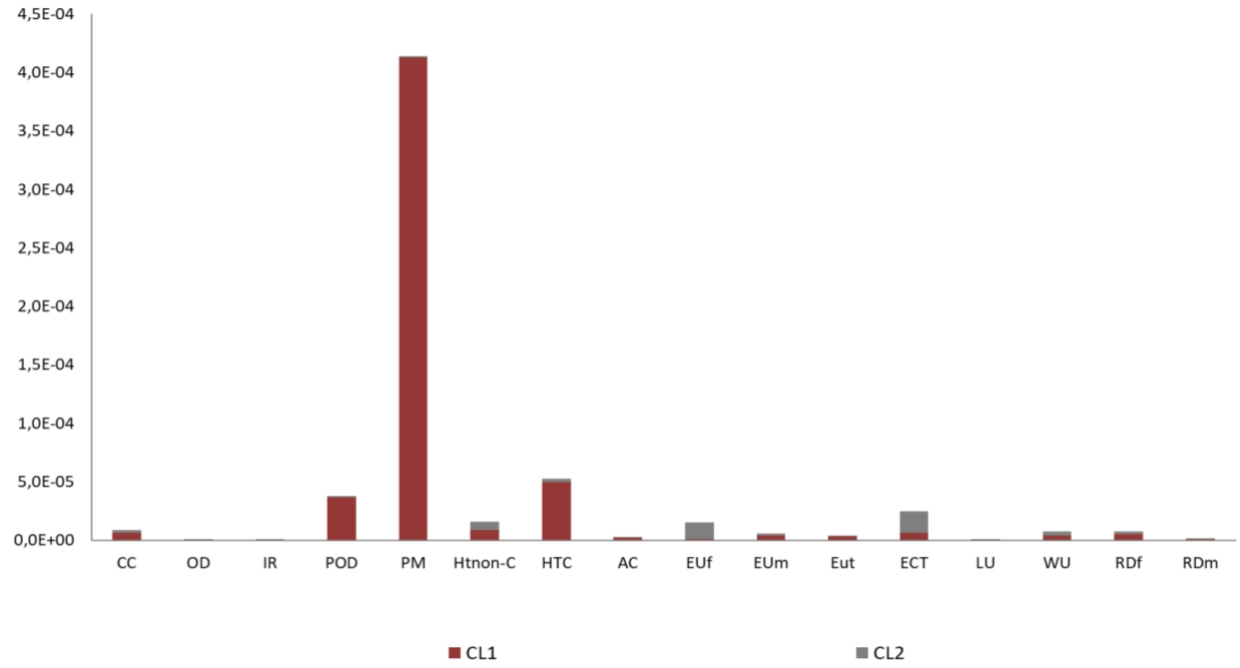


Figura 16 Impatti normalizzati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia, con i contributi dei processi CL1 e CL2

Tabella 20 Impatti normalizzati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia. Valori totali e valori per ciascun processo esaminato (CL1 e CL2)

Categorie d'impatto	Totale	CL1	CL2
CC	8,76E-06	6,65E-06	2,12E-06
OD	2,16E-07	1,81E-07	3,55E-08
IR	5,15E-07	3,68E-07	1,47E-07
POD	3,78E-05	3,68E-05	9,33E-07
PM	4,14E-04	4,13E-04	1,07E-06
HTnon-c	1,62E-05	8,71E-06	7,47E-06
HTc	5,26E-05	5,00E-05	2,60E-06
AC	3,03E-06	2,25E-06	7,79E-07
EUf	1,53E-05	1,15E-06	1,42E-05
EUm	5,76E-06	4,27E-06	1,49E-06
EUt	4,05E-06	3,38E-06	6,73E-07
ECT	2,50E-05	6,54E-06	1,85E-05
LU	4,18E-07	2,61E-07	1,57E-07
WU	7,46E-06	4,28E-06	3,18E-06
RDf	7,34E-06	4,96E-06	2,38E-06
RDm	1,78E-06	1,10E-06	6,72E-07

In dettaglio, in Figura 17 ed in Tabella 21, sono riportati gli impatti normalizzati per il processo di produzione di energia elettrica da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU (CL1), confermando lo stesso andamento visto in Figura 16, con un impatto predominante sulla categoria

PM, seguita da HTc e POD. Per tutte queste categorie, gli impatti sono quasi totalmente ascrivibili alle emissioni locali.

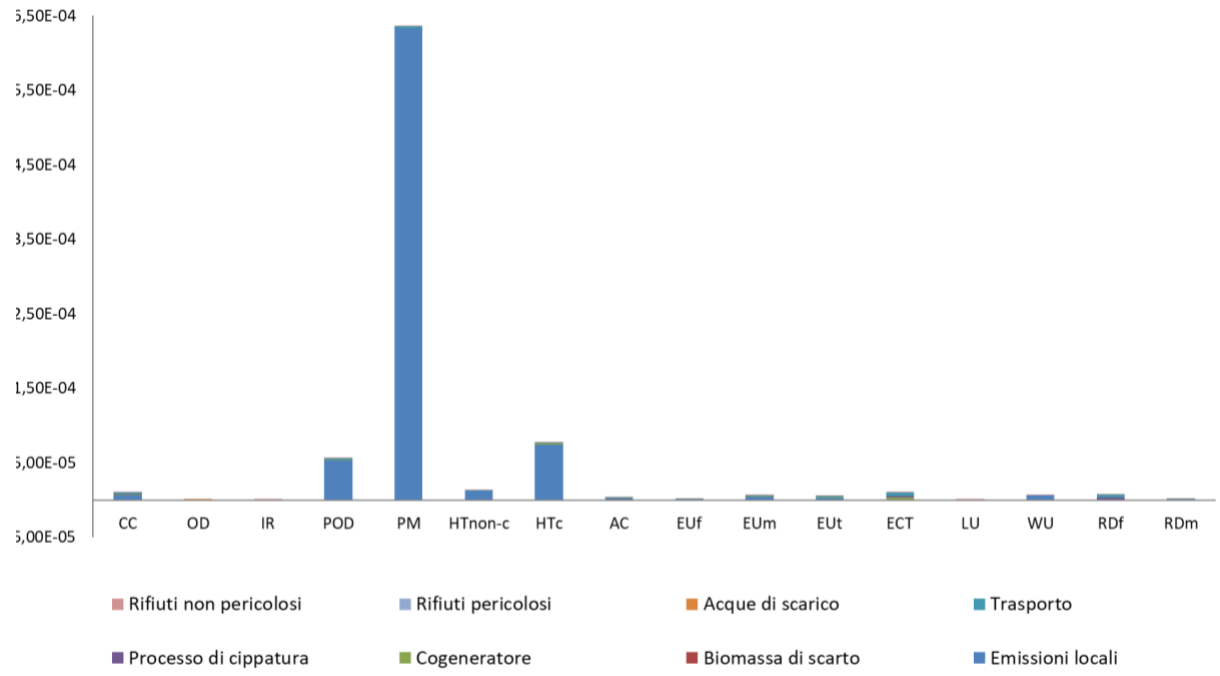


Figura 17 Impatti normalizzati per il processo CL1 (EE da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU)

Tabella 21 Impatti normalizzati calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide di provenienza diversa da RSU ("altre biomasse"), in Italia (CL1): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output.

Categorie d'impatto	Totale	Emissioni locali	Biomasse residuali	Cogeneratore	Cippatura	Trasporto	Acque di scarico	Rifiuti pericolosi	Rifiuti non pericolosi
CC	1,02E-05	6,69E-06	0,00E+00	5,82E-07	9,22E-07	2,00E-06	2,90E-08	2,36E-09	8,72E-10
OD	2,78E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,51E-07	5,42E-08	7,22E-08	1,84E-10	1,98E-11	4,06E-11
IR	5,66E-07	0,00E+00	0,00E+00	6,09E-08	1,93E-07	3,08E-07	4,01E-09	1,63E-10	1,86E-10
POD	5,66E-05	5,37E-05	0,00E+00	4,28E-07	2,91E-07	2,25E-06	1,67E-08	2,23E-09	1,59E-09
PM	6,35E-04	6,32E-04	0,00E+00	6,25E-07	1,79E-07	2,17E-06	2,17E-08	2,32E-09	1,94E-09
HTnon-c	1,34E-05	1,21E-05	0,00E+00	4,05E-07	8,79E-08	8,32E-07	1,56E-08	1,54E-09	3,15E-10
HTc	7,69E-05	7,43E-05	0,00E+00	2,11E-06	5,02E-08	4,00E-07	5,27E-08	5,56E-09	3,22E-10
AC	3,46E-06	4,14E-07	0,00E+00	6,34E-07	3,77E-07	2,02E-06	1,35E-08	1,43E-09	1,07E-09
EUf	1,76E-06	0,00E+00	0,00E+00	9,97E-07	8,79E-08	6,37E-07	3,41E-08	4,85E-09	1,29E-09
EUm	6,57E-06	4,79E-06	0,00E+00	2,55E-07	1,34E-07	1,37E-06	1,01E-08	1,01E-09	1,06E-09
EUt	5,20E-06	2,81E-06	0,00E+00	5,43E-07	1,62E-07	1,67E-06	1,19E-08	1,12E-09	1,27E-09
ECT	1,01E-05	5,52E-07	0,00E+00	2,74E-06	2,17E-06	4,50E-06	9,11E-08	9,96E-09	2,74E-09
LU	4,01E-07	0,00E+00	0,00E+00	4,61E-08	2,71E-08	3,25E-07	2,12E-09	5,79E-10	4,86E-10
WU	6,59E-06	6,34E-06	0,00E+00	2,55E-07	1,53E-09	6,95E-08	-8,32E-08	3,42E-10	6,28E-10
RDf	7,64E-06	0,00E+00	0,00E+00	9,04E-07	2,76E-06	3,94E-06	3,08E-08	3,25E-09	2,55E-09
RDm	1,70E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,02E-06	3,43E-08	5,85E-07	5,86E-08	5,68E-10	3,63E-10

In Figura 18 ed in Tabella 22, sono riportati gli impatti normalizzati per il processo di produzione di energia elettrica da biomasse da RSU (CL2). In questo caso, le categorie con impatti maggiori sono Ecotoxicity, freshwater (ECT), Eutrophication, freshwater (Euf) e Human toxicity, non-cancer (HTnon-c), per le quali l'impatto è quasi per la totalità ascrivibile all'impianto di cogenerazione (96%, 99% e 98%, rispettivamente), mentre, per la categoria WU, l'81% degli impatti è relativo alle

emissioni locali. Si sottolinea che gli impatti del processo CL2 sono di gran lunga inferiori a quelli del processo CL1 (vedi Tabella 20).

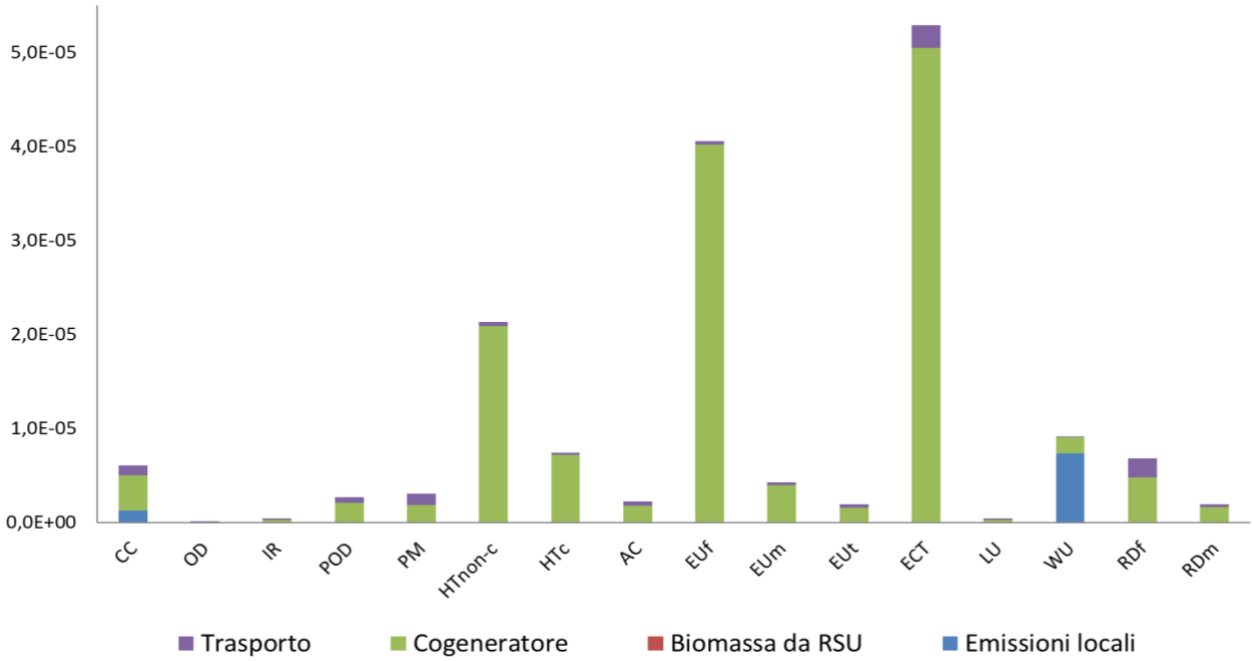


Figura 18 Impatti normalizzati per il processo CL2 (EE da biomasse da RSU).

Tabella 22 Impatti normalizzati calcolati per la produzione, in Italia, di 1 kWh elettrico da biomasse solide da RSU (CL2): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output

Categorie d'impatto	Totale	Emissioni locali	Biomassa da RSU	Termovalorizzatori	Trasporto
CC	6,05E-06	1,26E-06	0,00E+00	3,79E-06	9,98E-07
OD	1,01E-07	0,00E+00	0,00E+00	6,45E-08	3,69E-08
IR	4,19E-07	0,00E+00	0,00E+00	2,59E-07	1,60E-07
POD	2,67E-06	4,73E-09	0,00E+00	2,05E-06	6,11E-07
PM	3,04E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,86E-06	1,19E-06
HTnon-c	2,13E-05	6,25E-09	0,00E+00	2,09E-05	4,53E-07
HTc	7,42E-06	0,00E+00	0,00E+00	7,23E-06	1,82E-07
AC	2,23E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,77E-06	4,58E-07
EUf	4,05E-05	0,00E+00	0,00E+00	4,02E-05	3,41E-07
EUm	4,26E-06	0,00E+00	0,00E+00	3,96E-06	2,96E-07
EUt	1,92E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,57E-06	3,57E-07
ECT	5,29E-05	1,42E-10	0,00E+00	5,05E-05	2,36E-06
LU	4,49E-07	0,00E+00	0,00E+00	2,65E-07	1,84E-07
WU	9,09E-06	7,32E-06	0,00E+00	1,74E-06	3,78E-08
RDf	6,80E-06	0,00E+00	0,00E+00	4,78E-06	2,02E-06
RDm	1,92E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,61E-06	3,10E-07

8.3 Pesatura

In Figura 19 ed in Tabella 23, sono riportati i risultati della fase di pesatura, secondo il metodo EF 3.0.

Si evidenzia, a tal proposito, che, a seguito della mancanza, nel metodo LCIA adottato, dei relativi fattori di pesatura, sono state escluse, dalle tabelle e dalle figure, le seguenti categorie di impatto: CCf, CCb, CClu, HTnon-c-o, HTnon-c-i, HTnon-c-m, HTc-o, HTc-i, HTc-m, ECT-o, ECT-i e ECT-m.

La categoria con il peso maggiore è la Particulate Matter (PM), il cui carico ambientale è totalmente determinato dal processo CL1 (100%). Le altre categorie hanno pesi notevolmente inferiori o trascurabili. Per tutte le categorie d'impatto investigate, il contributo del processo CL1 è maggiore rispetto a quello del processo CL2, tranne che per EUf e ECT.

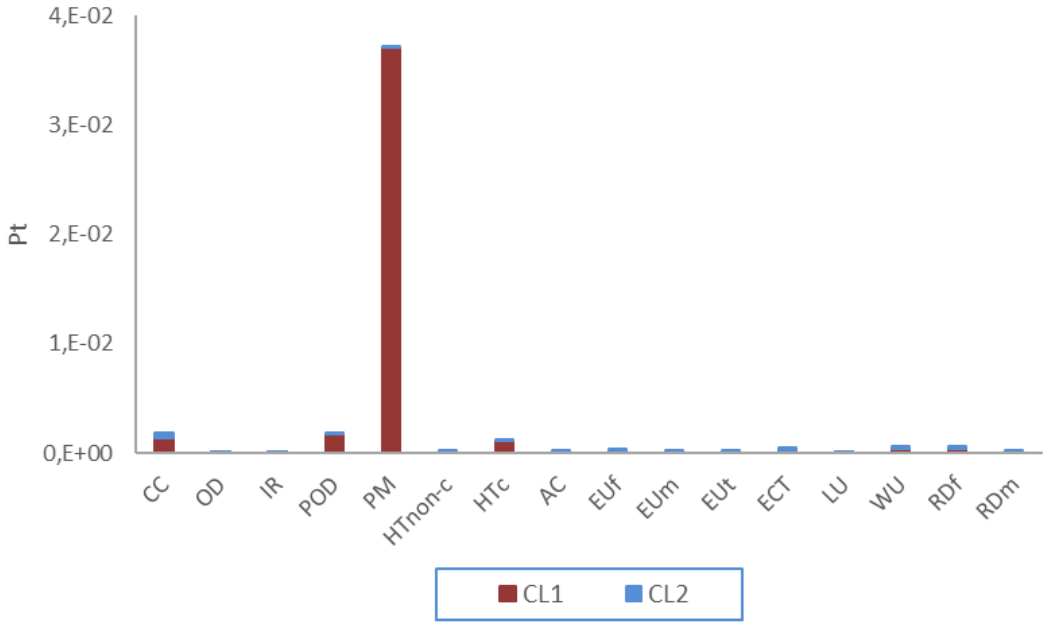


Figura 19 Impatti pesati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia, con i contributi dei processi CL1 e CL2

Tabella 23 Impatti pesati per la produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia. Valori totali e valori per ciascun processo esaminato (CL1 e CL2)

Categorie d'impatto	**Unità**	**Totale**	**CL1**	**CL2**
Totale	Pt	4,50E-02	4,29E-02	2,19E-03
CC	Pt	1,85E-03	1,40E-03	4,46E-04
OD	Pt	1,36E-05	1,14E-05	2,24E-06
IR	Pt	2,58E-05	1,84E-05	7,35E-06
POD	Pt	1,80E-03	1,76E-03	4,46E-05
PM	Pt	3,71E-02	3,70E-02	9,55E-05
HTnon-c	Pt	2,98E-04	1,60E-04	1,37E-04
HTc	Pt	1,12E-03	1,06E-03	5,53E-05
AC	Pt	1,88E-04	1,40E-04	4,83E-05
EUf	Pt	4,29E-04	3,21E-05	3,97E-04
EUm	Pt	1,71E-04	1,26E-04	4,41E-05
EUt	Pt	1,50E-04	1,25E-04	2,50E-05
ECT	Pt	4,81E-04	1,25E-04	3,55E-04
LU	Pt	3,32E-05	2,07E-05	1,25E-05
WU	Pt	6,35E-04	3,64E-04	2,71E-04
RDf	Pt	6,11E-04	4,13E-04	1,98E-04
RDm	Pt	1,34E-04	8,33E-05	5,07E-05

Il dettaglio della fase di pesatura per i due processi è riportato, per CL1, in Figura 20 e Tabella 24 e, per CL2, in Figura 21 e Tabella 25.
La pesatura per il processo CL1 conferma la rilevanza dell'impatto dovuto alle emissioni locali, con un valore medio, su tutte le categorie, del 43%, seguito dall'impatto riconducibile al trasporto, con un valore medio del 29%. Per la classe CL2, invece, il maggiore contributo deriva dal processo di trasformazione delle biomasse da RSU in energia elettrica (valore medio dell'impatto del 75%).

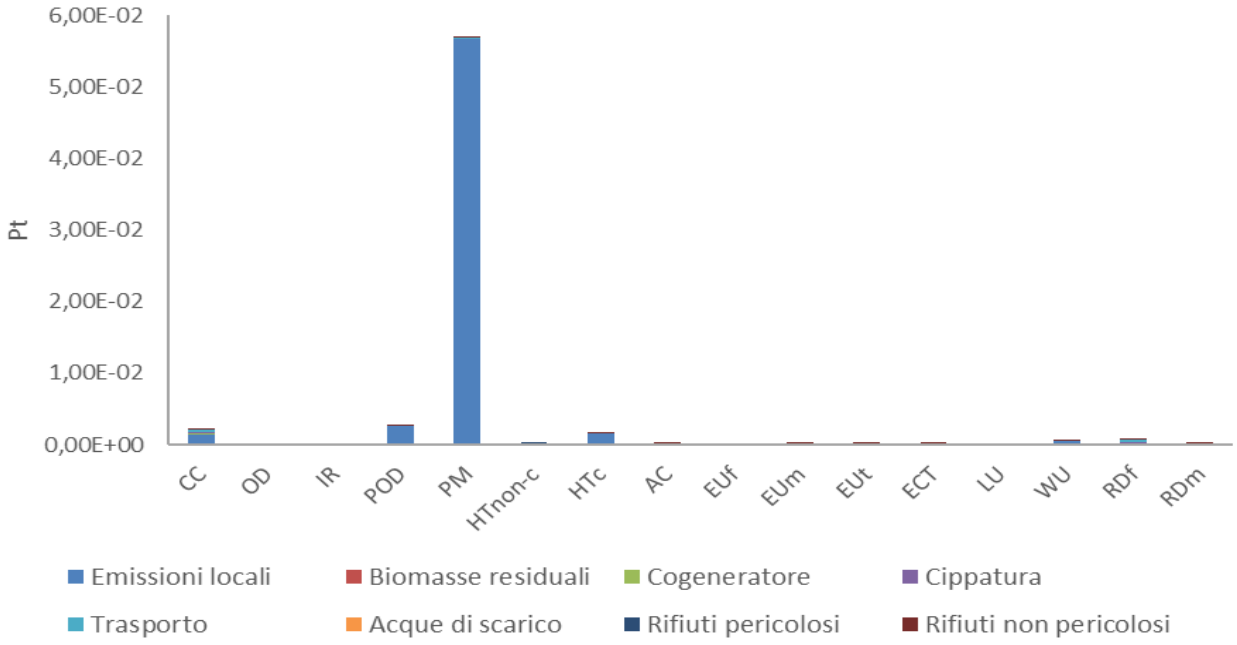


Figura 20 Impatti pesati per il processo CL1 (EE da biomasse residuali di provenienza diversa da RSU)

Tabella 24 Impatti pesati, calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide di provenienza diversa da RSU ("altre biomasse"), in Italia (CL1): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output

Categorie d'impatto	Unità	Totale	Emissioni locali	Biomasse residuali	Cogeneratore	Cippatura	Trasporto	Acque di scarico	Rifiuti pericolosi	Rifiuti non pericolosi
Totale	Pt	6,59E-02	6,33E-02	0,00E+00	5,89E-04	5,52E-04	1,50E-03	1,48E-05	1,84E-06	1,02E-06
CC	Pt	2,15E-03	1,41E-03	0,00E+00	1,23E-04	1,94E-04	4,21E-04	6,11E-06	4,97E-07	1,84E-07
OD	Pt	1,75E-05	0,00E+00	0,00E+00	9,54E-06	3,42E-06	4,56E-06	1,16E-08	1,25E-09	2,56E-09
IR	Pt	2,84E-05	0,00E+00	0,00E+00	3,05E-06	9,68E-06	1,54E-05	2,01E-07	8,15E-09	9,33E-09
POD	Pt	2,71E-03	2,56E-03	0,00E+00	2,05E-05	1,39E-05	1,07E-04	8,01E-07	1,06E-07	7,62E-08
PM	Pt	5,69E-02	5,67E-02	0,00E+00	5,60E-05	1,60E-05	1,95E-04	1,95E-06	2,08E-07	1,74E-07
HTnon-c	Pt	2,47E-04	2,22E-04	0,00E+00	7,46E-06	1,62E-06	1,53E-05	2,87E-07	2,84E-08	5,80E-09
HTc	Pt	1,64E-03	1,58E-03	0,00E+00	4,50E-05	1,07E-06	8,53E-06	1,12E-06	1,18E-07	6,86E-09
AC	Pt	2,15E-04	2,57E-05	0,00E+00	3,93E-05	2,34E-05	1,25E-04	8,35E-07	8,85E-08	6,63E-08
EUf	Pt	4,93E-05	0,00E+00	0,00E+00	2,79E-05	2,46E-06	1,78E-05	9,55E-07	1,36E-07	3,61E-08
EUm	Pt	1,94E-04	1,42E-04	0,00E+00	7,54E-06	3,96E-06	4,06E-05	3,00E-07	2,99E-08	3,12E-08
EUt	Pt	1,93E-04	1,04E-04	0,00E+00	2,01E-05	6,01E-06	6,21E-05	4,41E-07	4,16E-08	4,71E-08
ECT	Pt	1,93E-04	1,06E-05	0,00E+00	5,25E-05	4,16E-05	8,63E-05	1,75E-06	1,91E-07	5,26E-08
LU	Pt	3,19E-05	0,00E+00	0,00E+00	3,66E-06	2,16E-06	2,58E-05	1,69E-07	4,60E-08	3,85E-08
WU	Pt	5,60E-04	5,40E-04	0,00E+00	2,17E-05	1,30E-07	5,92E-06	-7,08E-06	2,91E-08	5,35E-08
RDf	Pt	6,35E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,52E-05	2,29E-04	3,28E-04	2,56E-06	2,70E-07	2,12E-07
RDm	Pt	1,28E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,69E-05	2,59E-06	4,41E-05	4,43E-06	4,29E-08	2,74E-08

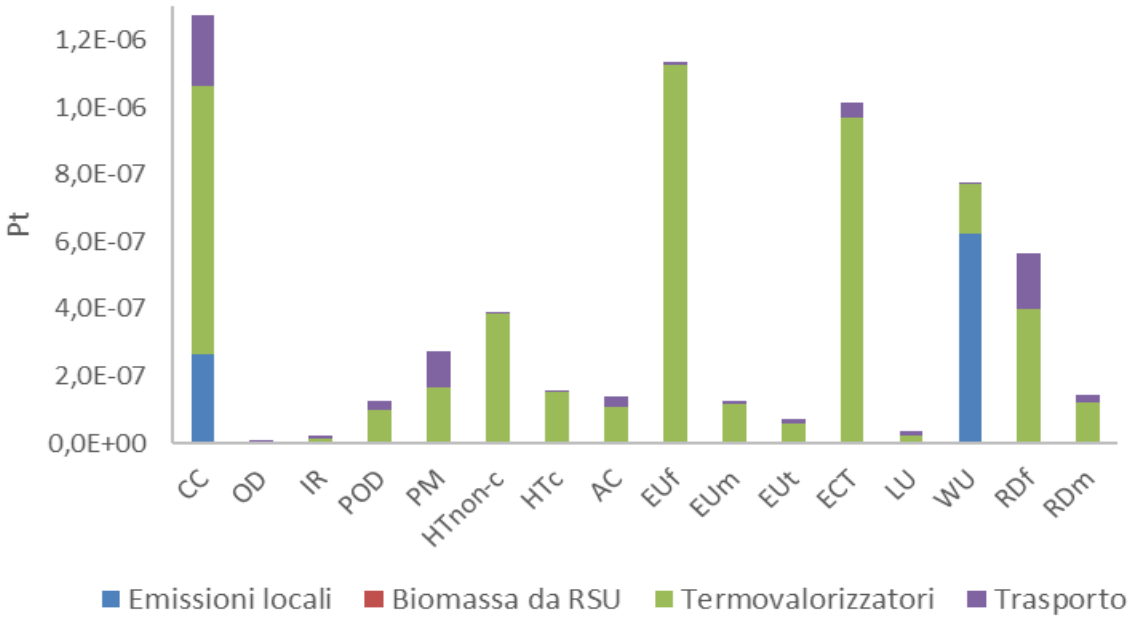


Figura 21 Impatti pesati per la classe CL2 (EE da biomasse da RSU).

Tabella 25 Impatti pesati, calcolati per 1 kWh elettrico da biomasse solide da RSU, in Italia (CL2): impatti totali e impatti suddivisi per ciascun flusso di input/output

Categorie d'impatto	Unità	Totale	Emissioni locali	Biomassa da RSU	Termovalorizzatori	Trasporto
Totale	Pt	6,26E-06	8,88E-07	0,00E+00	4,69E-06	6,83E-07
CC	Pt	1,27E-06	2,65E-07	0,00E+00	7,99E-07	2,10E-07
OD	Pt	6,40E-09	0,00E+00	0,00E+00	4,07E-09	2,33E-09
IR	Pt	2,10E-08	0,00E+00	0,00E+00	1,30E-08	8,01E-09
POD	Pt	1,27E-07	2,26E-10	0,00E+00	9,81E-08	2,92E-08
PM	Pt	2,73E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,66E-07	1,06E-07
HTnon-c	Pt	3,92E-07	1,15E-10	0,00E+00	3,84E-07	8,34E-09
HTc	Pt	1,58E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,54E-07	3,89E-09
AC	Pt	1,38E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,10E-07	2,84E-08
EUf	Pt	1,14E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,13E-06	9,56E-09
EUm	Pt	1,26E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-07	8,77E-09
EUt	Pt	7,14E-08	0,00E+00	0,00E+00	5,81E-08	1,33E-08
ECT	Pt	1,01E-06	2,73E-12	0,00E+00	9,70E-07	4,54E-08
LU	Pt	3,56E-08	0,00E+00	0,00E+00	2,10E-08	1,46E-08
WU	Pt	7,74E-07	6,23E-07	0,00E+00	1,48E-07	3,22E-09
RDf	Pt	5,66E-07	0,00E+00	0,00E+00	3,97E-07	1,68E-07
RDm	Pt	1,45E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-07	2,34E-08

8.4 Analisi di sensibilità

Nel presente studio, l'analisi di sensibilità è stata implementata considerando sia scelte metodologiche diverse sia delle variazioni relative alle assunzioni fatte per il trasporto delle biomasse.

In dettaglio, visto che dall'analisi della letteratura è emerso che nella maggioranza degli impianti italiani di conversione delle biomasse solide in energia, il calore generato viene dissipato, si è deciso di effettuare il confronto dello scenario base, in cui gli impatti non vengono allocati tra calore ed elettricità, con uno scenario alternativo che, invece, prevede il recupero e la valorizzazione del calore coprodotto. Per i dettagli relativi alla gestione della multifunzionalità nello scenario alternativo (con allocazione), si rimanda al paragrafo 5.4. In Tabella 26, si riporta il confronto degli impatti dello scenario base (1 kWh Electricity from solid biomass IT mix w/o allocation) con quelli dello scenario alternativo (1 kWh Electricity from solid biomass IT mix with allocation).

Tabella 26 Analisi di sensibilità sulle scelte metodologiche - Confronto degli impatti caratterizzati per la produzione di 1kWh di elettricità da biomasse solide in Italia, relativi agli scenari con (with) e senza (w/o) allocazione.

Categorie d'impatto	Unità	1 kWh Electricity from solid biomass IT mix w/o allocation	1 kWh Electricity from solid biomass IT mix with allocation	Variazione
CC	kg CO_2 eq	7,10E-02	3,48E-02	-51%
OD	kg CFC11 eq	1,16E-08	6,87E-09	-41%
IR	kBq U-235 eq	2,17E-03	1,08E-03	-50%
POD	kg NMVOC eq	1,53E-03	7,52E-04	-51%
PM	disease inc.	2,47E-07	1,21E-07	-51%
HTnon-c	CTUh	3,72E-09	1,77E-09	-52%
HTc	CTUh	8,88E-10	4,39E-10	-51%
AC	mol H+ eq	1,68E-04	8,63E-05	-49%
EUf	kg P eq	2,46E-05	1,14E-05	-54%
EUm	kg N eq	1,13E-04	5,48E-05	-51%
EUt	mol N eq	7,16E-04	3,61E-04	-50%
ECT	CTUe	1,07E+00	5,10E-01	-52%
LU	Pt	3,43E-01	1,69E-01	-51%
WU	m^3 depriv.	8,56E-02	4,09E-02	-52%
RDf	MJ	4,77E-01	2,37E-01	-50%
RDm	kg Sb eq	1,13E-07	6,38E-08	-44%
CCf	kg CO_2 eq	4,52E-02	2,22E-02	-51%
CCb	kg CO_2 eq	2,57E-02	1,26E-02	-51%
CClu	kg CO_2 eq	1,03E-05	5,35E-06	-48%
HTnon-c-o	CTUh	1,26E-10	6,19E-11	-51%
HTnon-c-i	CTUh	1,19E-08	5,81E-09	-51%
HTnon-c-m	CTUh	3,44E-09	1,63E-09	-53%
HTc-o	CTUh	8,12E-10	3,99E-10	-51%
HTc-i	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0%
HTc-m	CTUh	7,63E-11	4,06E-11	-47%
ECT-o	CTUe	3,49E-02	1,71E-02	-51%
ECT-i	CTUe	4,69E-01	2,15E-01	-54%
ECT-m	CTUe	5,64E-01	2,78E-01	-51%

Dal confronto dei potenziali impatti generati dai due scenari emerge che, nel caso in cui il calore venisse recuperato, si otterrebbe una riduzione media (su tutte le categorie investigate) del 48% degli impatti del processo di produzione di energia elettrica.

Inoltre, è stata fatta un'analisi di sensibilità per valutare le variazioni degli impatti legate alla provenienza della biomassa residuale. A tale scopo, per il processo di produzione di 1kWh di elettricità da biomasse solide di provenienza diversa da RSU in Italia (CL1), è stato creato uno scenario in cui tutta la biomassa è di esclusiva provenienza nazionale (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass_sensitivity_transport). Tale scenario è stato confrontato con lo scenario base (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass), in cui si era considerato un approvvigionamento del 10% della biomassa dall'estero (maggiori dettagli sulle assunzioni fatte per il trasporto sono riportate nel paragrafo 7.2 e nell'Allegato I). Come si evince dalla Tabella 27, l'utilizzo di biomassa locale (di provenienza esclusivamente italiana) porterebbe ad una riduzione media degli impatti del 12%.

Tabella 27 Analisi di sensibilità sui trasporti - Confronto degli impatti caratterizzati per il processo di produzione di 1kWh di elettricità da biomasse solide di provenienza diversa da RSU (CL1) in Italia, relativi agli scenari con (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass) e senza (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass_sensitivity_transport) biomasse di provenienza estera.

Categorie d'impatto	Unità	Electricity from solid biomass_CL1_other biomass	Electricity from solid biomass_CL1_other biomass_sensitivity_transport	Variazione
CC	kg CO_2 eq	8,28E-02	7,57E-02	-9%
OD	kg CFC11 eq	1,49E-08	1,33E-08	-11%
IR	kBq U-235 eq	2,39E-03	1,85E-03	-23%
POD	kg NMVOC eq	2,30E-03	2,24E-03	-3%
PM	disease inc.	3,78E-07	3,78E-07	0%
HTnon-c	CTUh	3,08E-09	3,00E-09	-2%
HTc	CTUh	1,30E-09	1,30E-09	0%
AC	mol H+ eq	1,92E-04	1,09E-04	-44%
EUf	kg P eq	2,83E-06	2,42E-06	-14%
EUm	kg N eq	1,28E-04	1,08E-04	-16%
EUt	mol N eq	9,19E-04	6,94E-04	-25%
ECT	CTUe	4,29E-01	3,50E-01	-18%
LU	Pt	3,29E-01	2,31E-01	-30%
WU	m^3 depriv.	7,55E-02	7,52E-02	0%
RDf	MJ	4,96E-01	3,88E-01	-22%
RDm	kg Sb eq	1,08E-07	9,30E-08	-14%
CCf	kg CO_2 eq	4,36E-02	3,65E-02	-16%
CCb	kg CO_2 eq	3,92E-02	3,92E-02	0%
CClu	kg CO_2 eq	9,29E-06	6,38E-06	-31%
HTnon-c-o	CTUh	1,87E-10	1,85E-10	-1%
HTnon-c-i	CTUh	1,81E-08	1,81E-08	0%
HTnon-c-m	CTUh	2,82E-09	2,76E-09	-2%
HTc-o	CTUh	1,24E-09	1,24E-09	0%
HTc-i	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0%
HTc-m	CTUh	5,72E-11	5,49E-11	-4%
ECT-o	CTUe	4,57E-02	3,92E-02	-14%
ECT-i	CTUe	9,36E-02	7,33E-02	-22%
ECT-m	CTUe	2,90E-01	2,38E-01	-18%

9 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione dello studio di ciclo di vita del processo di produzione di 1 kWh di elettricità da biomasse solide in Italia si basa su un'analisi critica dei risultati delle diverse fasi di produzione, secondo un approccio dalla culla al cancello (cradle-to-gate). Lo studio è finalizzato, in accordo con le norme UNI EN ISO 14040-44, a identificare le cause dei principali impatti ambientali potenziali rilevati, fornire delle conclusioni, spiegare le limitazioni dello studio e dare delle raccomandazioni per minimizzare gli impatti, sulla base dei risultati ottenuti.
In questo studio, i dati utilizzati possono ritenersi di buona qualità, in quanto i dati relativi al primo dataset (processo CL1) sono dati primari, forniti come medie nazionali dall'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS), mentre per il secondo dataset (processo CL2) sono stati usati dati relativi a 7 impianti di termovalorizzazione, selezionati sul portale di Atlaimpianti in modo da rappresentare la realtà nazionale. L'unica limitazione dello studio è rappresentata dall'assenza di dati primari relativi all'impiantistica ed al trasporto. Ciononostante, tali flussi sono stati opportunamente modellati a partire da dati secondari in database di settore, considerando comunque dati primari per le emissioni generate dai processi di conversione energetica delle biomasse.
Nei seguenti sotto-paragrafi sono evidenziate le categorie d'impatto più rilevanti ed i principali hotspot del sistema analizzato.

9.1 Categorie di impatto rilevanti

Dall'analisi dei risultati ottenuti si evince che, per la produzione di 1 kWh di elettricità da biomasse solide in Italia, la categoria che presenta gli impatti più rilevanti è la Particulate Matter (PM) sia dopo la normalizzazione che dopo la pesatura, seguita da Human toxicity, cancer (HTc) e Photochemical ozone formation (POD) (Figura 16 e Figura 19). L'impatto su tali categorie è principalmente ascrivibile al processo di conversione energetica delle biomasse solide di origine agro-forestale e industriale (CL1) che contribuisce agli impatti totali per circa il 70% in media su tutte le categorie d'impatto investigate. L'impatto del processo CL1 dipende soprattutto dalle emissioni locali legate al processo di conversione energetica (circa il 50%), e solo secondariamente dal trasporto delle biomasse (circa 26%), vista l'ampia implementazione del concetto della filiera corta promossa dal DM 2/3/2010.
Invece, per il processo di produzione di 1kWh di elettricità da biomasse solide da RSU in Italia (CL2), la normalizzazione mostra che la categoria più impattata è la Ecotoxicity, freshwater (ECT), seguita da Eutrophication, freshwater (EUf) e da Human toxicity, non-cancer (HTnon-c), come mostrato in Figura 18. A valle della pesatura, le categorie che presentano gli impatti maggiori per il processo CL2 sono CC, EUf e ECT (Figura 21). Tali impatti sono dovuti principalmente (circa il 75%) alla conversione energetica nei termovalorizzatori. È, in ogni caso, importante sottolineare che in media il contributo del processo CL2 per tutte le categorie investigate è di circa il 30%.

9.2 Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti

Il contributo alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide in Italia deriva per il 65% dall'impiego di biomasse solide diverse da RSU (CL1) e per il restante 35% da biomasse da RSU (CL2), in accordo con le informazioni riportate nel report del GSE (GSE, 2022). Pertanto, il processo CL1 risulta avere un impatto complessivo molto più elevato (circa il 70%) rispetto al processo CL2.
Analizzando nel dettaglio le categorie d'impatto più rilevanti, emerge che il processo CL1 determina la totalità degli impatti per la categoria PM, a causa delle emissioni locali generate nel processo di conversione delle biomasse solide di provenienza diversa da RSU in energia elettrica. Analogamente, per le categorie HTc e POD, il processo CL1 contribuisce agli impatti totali rispettivamente per il 98%

e per il 95%, sempre a causa delle emissioni locali. Nel caso della categoria CC, emersa come categoria rilevante in fase di pesatura, il processo CL1 contribuisce per il 76% degli impatti, mentre il restante 24% è generato dal processo CL2 e, in particolare, dagli impatti relativi all'impianto di trattamento (64%).
Nel caso del processo CL2, il contributo della conversione della biomassa nell'impianto di termovalorizzazione va oltre il 96% in tutte le categorie che mostrano i maggiori impatti normalizzati (ECT, EUf e HTnon-c). Nella pesatura, è da sottolineare un contributo non trascurabile alla categoria CC sia delle emissioni locali sia del trasporto (21% e 16%, rispettivamente, contro un contributo del 63% del termovalorizzatore).

9.3 Flussi elementari rilevanti

Nella maggior parte delle categorie di impatto investigate, i flussi elementari più rilevanti sono quelli relativi alle emissioni in aria dei processi di conversione delle biomasse solide (sia da RSU che di origine diversa da RSU) in energia elettrica.
L'analisi dei flussi è stata effettuata sulle categorie d'impatto più rilevanti. In particolare, per il processo CL1 i principali flussi per la categoria PM sono le emissioni in aria di particolato PM2.5 e di particolato PM10 che contribuiscono rispettivamente per l'82% e il 17%. Invece, i flussi elementari di maggiore rilievo sono il Benzo[α]pyrene (66%) e il Benzo[ß]fluoranthene (18%) per la categoria HTc e NMVOC (85%) e NO_x (10%) per la categoria POD.
Per il processo CL2 i flussi più significativi sono le emissioni associate al processo di incenerimento. In dettaglio, per la categoria ECT, tali flussi sono rappresentati dalle emissioni di cloruro, in acqua, (50%) seguite da quelle di alluminio nei tre comparti ambientali (44%). Invece, per la categoria EUf l'impatto maggiore è dovuto alle emissioni di fosfato in acqua (99%), e per la categoria HTnon-c alle emissioni di arsenico in acqua (90%). Infine, per la categoria CC, si registra un elevato impatto del flusso di anidride carbonica (74%), associato al processo di incenerimento (58%) e al trasporto (16%), e del flusso di protossido di azoto (20%) legato alle emissioni dirette del processo di conversione energetica.

10 Conclusioni

Nel presente report, vengono presentati i risultati dello studio LCA applicato alla filiera di produzione di energia elettrica da biomasse solide in Italia, analizzando le varie fasi di produzione ed evidenziandone i principali impatti potenziali. Nell'ambito della filiera, sono stati presi in considerazione due processi di produzione di energia elettrica da biomasse solide, distinti in base alla natura delle biomasse utilizzate: biomasse solide di scarto provenienti dai comparti forestale, agricolo ed agroindustriale ("altre biomasse") e biomasse da Rifiuti Solidi Urbani (RSU). Pertanto, trattandosi di biomasse residuali per entrambi i processi, è stato applicato alle biomasse un approccio "zero burden", in accordo con la letteratura di settore.
Lo studio ha quindi previsto lo sviluppo di tre distinti dataset: (i) il primo dataset è relativo alla produzione di energia elettrica da altre biomasse solide (Electricity from solid biomass_CL1_other biomass); (ii) il secondo dataset si riferisce alla produzione di energia elettrica dalle biomasse degli RSU (Electricity from solid biomass_CL2_biomass from MSW) ed infine (iii) è stato definito un terzo dataset, relativo alla produzione di 1 kWh elettrico da biomasse solide, in Italia (1kWh Electricity from solid biomass IT mix), combinando i due processi unitari CL1 (65%) e CL2 (35%), in accordo con le informazioni riportate nel report del GSE (GSE, 2022), inerenti ai dati di produzione di energia elettrica da biomasse solide, relativi all'anno 2020.

I dati utilizzati si possono ritenere rappresentativi del contesto italiano, sia in termini geografici che tecnologici. In particolare, i dati relativi al primo dataset (CL1) sono dati primari, forniti come medie nazionali dall'Associazione Energia da Biomasse Solide (EBS). Per il secondo dataset, sono stati usati dati secondari relativi a 7 impianti di termovalorizzazione, selezionati sul portale di Atlaimpianti in modo da rappresentare la realtà nazionale. La principale limitazione dello studio è legata alla carenza di dati primari per i flussi di background, di impiantistica e di trasporto, che comunque sono stati opportunamente modellati considerando dati secondari di buona qualità dalla letteratura di settore (banche dati LCA).
Nello studio LCA si è adottato un approccio "cradle-to-gate", ovvero un approccio che considera tutti i flussi ed i processi fino alla produzione di energia elettrica da biomasse solide, senza considerare le successive fasi di distribuzione, uso e fine vita.
I risultati dello studio LCA del dataset relativo alla filiera di produzione di 1 kWh di energia elettrica da biomasse solide, in Italia, sono stati ottenuti tramite il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0. Tale metodo è stato indicato dalla Commissione Europea come strumento di valutazione nell'ambito dell'iniziativa sull'impronta ambientale in quanto consente di ottenere un profilo di impatto completo a livello di prodotto. I risultati ottenuti nel presente studio indicano che il principale hotspot del processo di produzione di 1 kWh di energia elettrica da biomasse solide, in Italia, è il processo unitario di produzione di elettricità da altre biomasse (CL1), che, da solo, contribuisce agli impatti totali per circa il 70% in media per tutte le categorie d'impatto investigate. Le emissioni locali generate dalla conversione delle biomasse in elettricità risultano essere il flusso maggiormente impattante, con un contributo medio del 48%. A seguire, il trasporto contribuisce con il 26% in media e, infine, l'impiantistica (impianto di cogenerazione) e il pretrattamento di cippatura apportano un impatto medio di circa il 16% e il 9%, rispettivamente.
I risultati per il processo CL2 (elettricità da biomasse derivanti da RSU), invece, evidenziano che il contributo relativo delle infrastrutture diventa predominante (circa 75%), mentre il trasporto (circa 16%) e le emissioni locali generate durante la fase di conversione (circa 8%) contribuiscono agli impatti in misura minore.
La normalizzazione e la pesatura indicano gli impatti maggiori per la categoria Particulate Matter (PM) per il processo CL1, a causa delle emissioni locali della fase di conversione energetica delle biomasse. Per il processo CL2, invece, le categorie Ecotoxicity, freshwater (ECT) e Climate change (CC) risultano essere le categorie con impatti maggiori, a valle rispettivamente della normalizzazione e della pesatura. Tali impatti sono legati principalmente agli impianti di termovalorizzazione e alle emissioni locali da essi generati.
I risultati di questo studio sono perfettamente in linea con l'orientamento della comunità scientifica internazionale che negli ultimi anni ha sottolineato la necessità di adeguare gli impianti e le tecnologie al fine di minimizzare le emissioni.
L'analisi di sensibilità svolta focalizzando l'attenzione sia sulle scelte metodologiche (allocazione exergetica per la co-produzione di elettricità e calore) sia sulle assunzioni fatte relativamente alla provenienza delle biomasse e di conseguenza al trasporto ha evidenziato dei potenziali miglioramenti del processo investigato. Nel caso della co-produzione, gli impatti medi su tutte le categorie investigate si riducono di circa il 48%, indicando l'urgente necessità di recuperare e valorizzare il calore co-prodotto, anche in virtù dell'attuale crisi energetica. Anche l'approvvigionamento di biomasse locali, di provenienza esclusivamente italiana, genera una riduzione degli impatti da non sottovalutare (circa il 12% in media su tutte le categorie investigate). In aggiunta, un maggiore sfruttamento delle biomasse locali favorirebbe sia la crescita economica di zone marginali, portando allo sviluppo di nuove competenze e contrastando il loro abbandono, sia la cura del patrimonio boschivo, con conseguente diminuzione degli incendi e del dissesto idrogeologico.

11 Bibliografia

Apros, 2020: http://blog.apros.it/2020/03/27/emissioni-biomasse-solide-turnover-tecnologico-e-incentivi/ (ultimo accesso, giugno 2023)

Bajwaa D.S., Peterson T., Sharma N., Shojaeiarani J., Bajwa S.J., 2018. A review of densified solid biomass for energy production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 96, 296–305. DOI https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040

Bejan A., 1989. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. International Journal of Heat Fluid Flow 10(1):87–88. https://doi.org/ 10.1016/ 0142- 727x (89) 90062-3.

Cambero C., Sowlati T., 2014. Assessment andoptimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 36, 62–73. DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041.

Castelli S., Sala C, 2016. Sostenibilità delle colture legnose a rapido accrescimento. Preprint - book: Biomasse Legnose: petrolio verde per il teleriscaldamento italiano Numero volume della serie/collana -, Publisher: Ramponi, Sondrio (Italia), Editors: Politecnico di Milano, pp.167-176. DOI https://www.researchgate.net/publication/293133057

Clift, R., Doig, A., Finnveden, G., 2000. The application of life cycle assessment to integrated solid waste management. Process Saf. Environ. Protect. 78 (4), 279e287.

CNR - IIA, 2019. Manuale tecnico-scientifico a cura di Rotatori M., Di Franco S., Salvatori R., Mosca S. (CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, Istituto sull'Inquinamento Atmosferico e-mail: direzione@iia.cnr.it). Studio sugli effetti ambientali connessi all'impiego della biomassa solida per la produzione di energia elettrica. ISBN 978-88-6224-017-8.

Colantoni A., Delfanti L., Recanatesi F., Tolli M., Lord R., 2016. Land use planning for utilizing biomass residues in Tuscia Romana (central Italy): Preliminary results of a multi criteria analysis to createan agro-energy district. Land Use Policy. 50, 125–133. DOI https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.012

Corona P., Tognetti R., Monti A., Nardi S., Faccoli M., Salvi S., Casini L., et al., 2019. Agricultural and forest biomass production for energy use. Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology. 16, 26-31. DOI https://doi.org/10.3832/efor3001-016

Cucchiella F., D'Adamo I., Gastaldi M., 2014. Sustainable management of waste-to-energy facilities. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 33, 719–728. DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.015

Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. Link: https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2011/03/28/011G0067/sg (ultimo accesso, aprile 2022)

Decreto Ministeriale 2 marzo 2010. Attuazione della legge 27 dicembre 2006, n. 296, sulla tracciabilità delle biomasse per la produzione di energia elettrica.

Decreto ministeriale 6 luglio 2012 ed allegati - Incentivi per energia da fonti rinnovabili elettriche non fotovoltaiche. Link: https://www.mise.gov.it/images/stories/normativa/DM_6_luglio_2012_sf.pdf (ultimo accesso novembre 2022)

DIRETTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione)

Direttiva 2009/28/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili e recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE. Link: https://eur-lex.europa.eu/legal content/IT/TXT/?uri=celex%3A32009L0028 (ultimo accesso, febbraio 2022).

Dispense UNINA, 2012. Energia da Biomasse. Corso di Gestione delle Risorse Energetiche, D.E.TE.C - Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica applicata e Condizionamenti ambientali. Link https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/257947(ultimo accesso settembre 2022).

Dispense Università di Roma Sapienza. Sistemi energetici – Biomasse. Link: http://www.ingmecc.uniroma1.it/attachments/2300_Lez%20SE%20-Biomasse.pdf (ultimo accesso settembre 2022) doi: https://doi.org/10.3832/efor3001-016

EBS, 2017. Audizione presso la 13ª Commissione del Senato della Repubblica: https://www.senato.it/application/xmanager/projects/leg17/attachments/documento_evento_procedura_commissione/files/000/004/843/Documentazione_EBS.pdf (ultimo accesso giugno 2023)

EBS (Energia da Biomasse Solide), 2020. Link: https://biomasseenergia.eu/ (ultimo accesso, novembre 2022).

EBS (Energia da Biomasse Solide), 2019. Link: https://www.utopialab.it/wp-content/uploads/2019/06/19_06_19-1-rapporto-socio-economico-e-ambientale-2019-def.pdf (ultimo accesso, novembre 2022).

Ekvall T, Assefa G, Björklund A, Eriksson O, Finnveden G., 2007a. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. Waste Management (Oxford). 27, 989–996.

ENAMA (Ente Nazionale per la Meccanizzazione Agricola), 2011. Progetto biomasse. Biomasse ed energia. Cap. 1-5.

ENEA, 2020. Considerazioni sullo stato dell'arte e le prospettive di sviluppo delle bioenergie in Italia. Link:https://www.camera.it/application/xmanager/projects/leg18/attachments/upload_file_doc_acquisiti/pdfs/000/004/007/Memoria_ENEA.pdf (ultimo accesso, novembre 2022).

Enti Locali Online:
https://www.entilocali-online.it/ebs-energia-da-biomasse-virtuosa-per-ambiente-ed-economia/ (ultimo accesso a giugno 2023)

EurObserv'ER,2018. BIOFUEL BAROMETER. Link https://www.eurobserv-er.org/pdf/biofuels-barometer-2018/ (ultimo accesso, maggio 2022)

EurObserv'ER,2020. BIOFUEL BAROMETER. Link: file:///C:/Users/Antonella%20Cerbone/Downloads/2020-Baro-Biomasse-Solide-GB-1.pdf (ultimo accesso, novembre 2022).

FIPER (Federazione di Produttori di Energia da Fonti Rinnovabili), 2015. Biomasse Legnose - Petrolio verde per il teleriscaldamento italiano. Link: https://www.fiper.it/wp-content/uploads/libroFIPER-biomasse-legnose-petrolio-verde-per-il-teleriscaldamento-italiano.pdf (ultimo accesso, novembre 2022).

FIPER (Federazione di Produttori di Energia da Fonti Rinnovabili), 2018. TELERISCALDAMENTO A BIOMASSA: UN INVESTIMENTO PER IL TERRITORIO. Analisi delle ricadute economiche, energetiche e ambientali su scala locale e nazionale. ISBN:9788894343700.

Fondazione Università Cà Foscari, 2019. RICADUTE SOCIO-ECONOMICHE DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA DA BIOMASSE SOLIDE. Relazione finale, Responsabile tecnico scientifico: prof.ssa Carmen Marchiori. Link: https://www.centralemercure.it/wp-content/uploads/2020/06/RICADUTE-SOCIO-ECONOMICHE-DELLA-PRODUZIONE-DI-ENERGIA-DA-BIOMASSE-SOLIDE.pdf (ultimo accesso, novembre 2022).

Goedkoop M., Oele M., Tomm J.L., 2016. Introduction to LCA with SimaPro. Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike Retrieved November 6, 2019. www.pre-sustainability.com http://creativecommons.org/.

GSE (Gestore Servizi Energetici), 2022. Rapporto Statistico 2020 sulle fonti rinnovabili. https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20Statistico%20GSE%20-%20FER%202020.pdf (ultimo accesso, maggio 2022).

Ispra (Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale), 2010. A cura di Paina A., Piccinini S., Rossi L. Studio sull'utilizzo di biomasse combustibili e biomasse rifiuto per la produzione di energia. Rapporti 111/2010. ISBN 978-88-448-0440-4. Link: https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/Rapporto1112010bassa.pdf (ultimo accesso, maggio 2022)

ISPRA (Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale), 2019. Comunicazione personale: EF combustion 2019 - Link: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ghYHc2jcpA0J:emissioni.sina.isprambiente.it/wp-content/uploads/2021/09/EF-combustion-2019-1.xlsx&cd=6&hl=it&ct=clnk&gl=it (ultimo accesso, settembre 2022).

Kauter D., Lewandowski I., Claupein W., 2003.Quantity and quality of harvestable biomass from Populus short rotation coppice for solid fuel use - A review of the physiological basis and management influences. Biomass and Bioenergy. 24(6), 411-427 DOI:10.1016/S0961-9534(02)00177-0

Makarichi L., Jutidamrongphan W., Techatob K., 2018. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 91, 812–821. DOI https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088

Masiero M., Adrighetto N., Pettenella D., 2013. Linee-guida per la valutazione sistematica della filiera corta delle biomasse legnose a fini energetici. Agriregionieuropa anno 9 n°33, p. 74

Mattiaccio M., 2019: https://terraevita.edagricole.it/energie-rinnovabili/lenergia-da-biomasse-vale-fino-a-280-milioni-allanno/ (Ultimo accesso a giugno 2023)

Mite (MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA), 2022. LA SITUAZIONE ENERGETICA NAZIONALE NEL 2021. Luglio 2022. Link: https://dgsaie.mise.gov.it/pub/sen/relazioni/relazione_annuale_situazione_energetica_nazionale_dati_2021.pdf (ultimo accesso, dicembre 2022)

Nakatani, J., 2014. Life cycle inventory analysis of recycling: mathematical and graphical frameworks. Sustainability 6 (9), 6158

Politecnico di Milano, 2011. Il sistema industriale lombardo nel business delle biomasse (nell'ambito del progetto REN LAB). Link: https://www.milomb.camcom.it/c/document_library/get_file?uuid=62fb745d-fae2-4997-96d0-9720e017e2b1&groupId=10157 (ultimo accesso, agosto 2022)

Proposta di Piano Nazionale Integrato Energia Clima, 2030. Link: https://energiaclima2030.mise.gov.it/index.php/il-piano/obiettivi

Regione Marche, 2013. La filiera legno-energia - Aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive. A cura di Bordoni A., Romagnoli E., Riva G., Cozzolino E., Rossini G., Toscano G., Foppa Pedretti E. ISBN 978-88-8249-082-9 (e- mail: romagnoli_emilio@assam.marche.it)

Roselli C., Sasso M., Sibilio S., Tzscheutschler P., 2011. Experimental analysis of microcogenerators based on different prime movers. Energy and Buildings. 43, 796- 804. DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.021

Santambriogio M., 2021 Tesi di laurea. Economia Circolare E Sostenibilità Ambientale Dell'industria Italiana Del Legno. Luiss, Dipartimento di Impresa e Management.

Scrucca F., Rinaldi C., Morara E., Argnani A., 2021. Report Arcadia "Studio di filiera – Cippato forestale".

Sharma B., Ingalls R.G., Jones C.L., Khanchi A., 2013. Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 24, 608–627. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.049

Tosi F., 018: https://industriale.viessmann.it/blog/biomassa-legnosa-fonte-rinnovabile-economica-sostenibile (ultimo accesso a giugno 2023)

Vignini A.M., 2012. Tesi di dottorato: Strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici: analisi della sostenibilità di una filiera agroenergetica nell'ambiente montano dell'Alto Mugello (Toscana).

Zampori L., Pant R., 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959.

Zucaro A., Fierro A., Forte A., 2019. A Review on Potential Candidate Lignocellulosic Feedstocks for Bio-energy Supply Chain. In: Basosi R., Cellura M., Longo S., Parisi M. (eds) Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies. Green Energy and Technology. Springer, Cham, pp. 119-138. (Print ISBN 978-3-319-93739-7. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-93740-3_8).

LA FILIERA DELLE BIOMASSE SOLIDE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN ITALIA

Allegato I: Documentazione a supporto

Output: Progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse

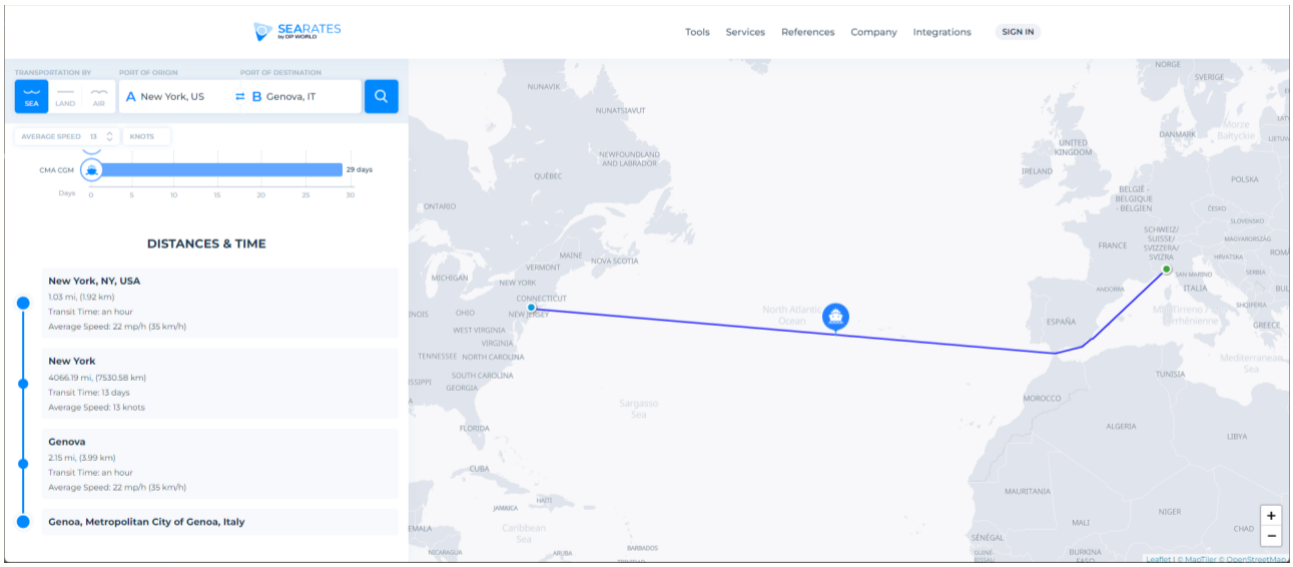
Linea di intervento 2: Realizzazione della Banca Dati Italiana LCA

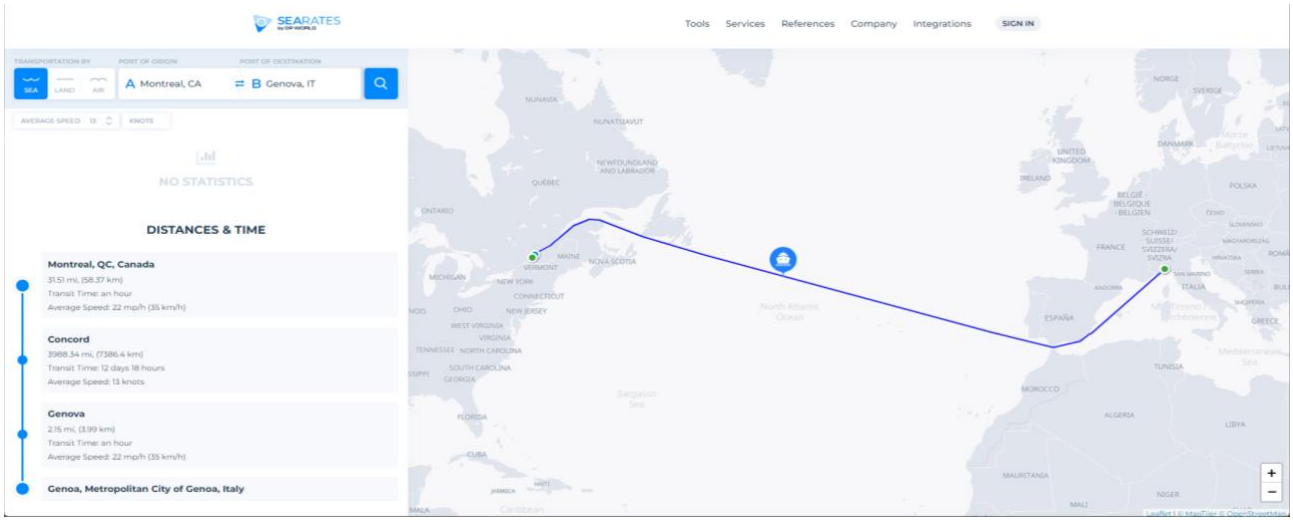
Azione 5: Analisi e raccolta dati per la costruzione della Banca Dati

Calcolo delle distanze di trasporto delle biomasse estere, utilizzate nello studio di filiera

Le distanze sono state calcolate prendendo in considerazione i principali porti commerciali. In dettaglio, per l'Italia è stato scelto il porto di Genova (2° per quantità di merci sbarcate, nel 2021[5]), anche per la sua posizione geografica strategica, mentre, per USA e Canada, sono stati selezionati rispettivamente i porti di New York e Montreal, sempre tenendo conto anche della loro posizione geografica.

Trasporto in nave da oltreoceano		
Provenienza	**Distanza (km)**	**Fonte**
Canada (Montreal,QC)	7386	https://www.searates.com/services/distances-time/
USA (New York)	7531	
Distanza media in nave	**7458,5**	



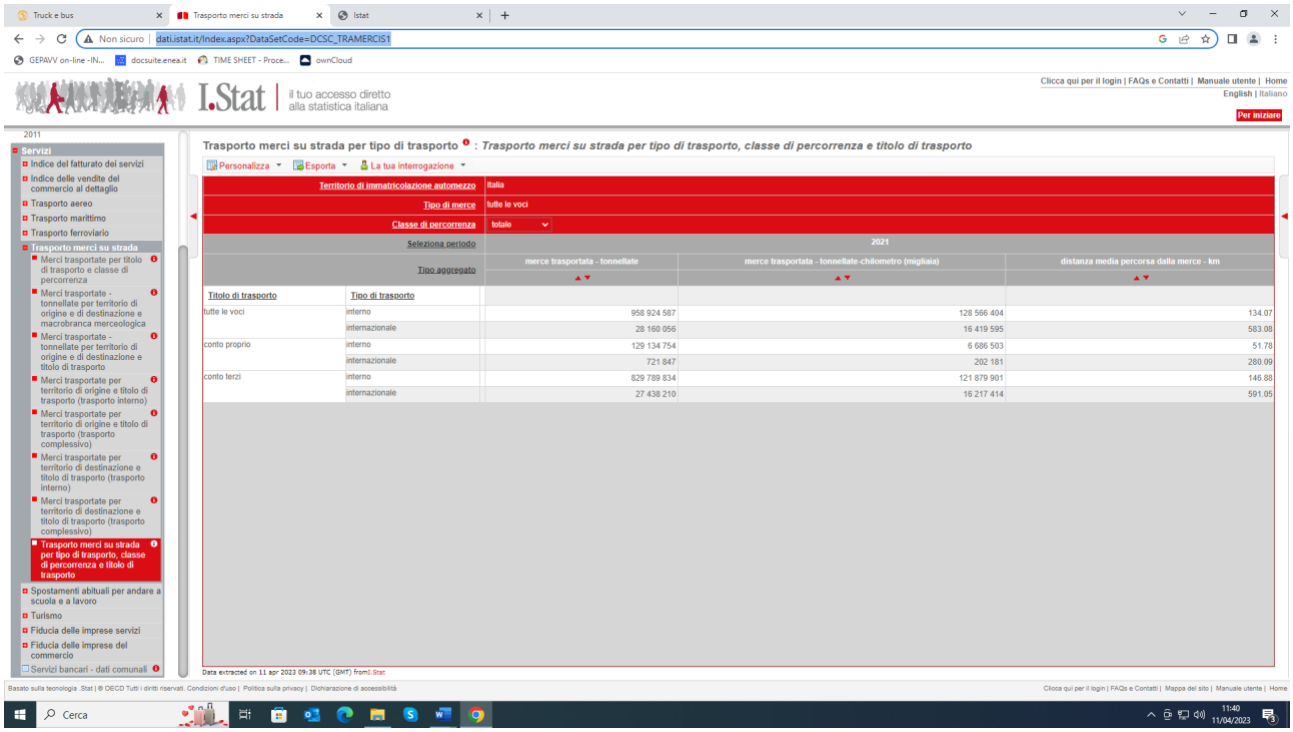


[5] http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#

Il trasporto delle biomasse a livello europeo è stato considerato tutto su gomma, in quanto solo una parte trascurabile (<10%) delle biomasse è trasportata su ferro o per via aerea (https://www.istat.it/storage/ASI/2021/capitoli/C20.pdf).

Trasporto su gomma		
Provenienza	**Distanza (km)**	**Note/Fonte**
Distanza media europea	543	http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#
Distanza media nazionale*	125	

** Distanza media di trasporto delle biomasse estere sul territorio nazionale. Tale distanza va aggiunta alla distanza dall'estero fini ai confini italiani.*



LA FILIERA DELLE BIOMASSE SOLIDE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN ITALIA

Allegato II: Dati primari dei processi CL1 e CL2

Output: Progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse

Linea di intervento 2: Realizzazione della Banca Dati Italiana LCA

Azione 5: Analisi e raccolta dati per la costruzione della Banca Dati

AZIENDA EBS	CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO		PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA - EE (MWh)			BIOMASSE - (t)			ACQUA - flussi annuali (m³)				RIFIUTI - flussi annuali (t)				CALORE TEORICO PRODOTTO (MWht)	NOTE
	Potenza Elettrica (MWe)	Potenza Termica (MWt)	EE totale prodotta	EE ceduta	EE autoconsumata (%) *dato fornito da EBS	Cippato da biomassa legnosa (scarti di origine agro-forestale) t/anno	Cippato da biomassa non legnosa (residui agro-alimentari) t/anno	Biomassa (t)/kWh	Acqua industriale utilizzata da consorzio	Acqua industriale utilizzata proveniente dai pozzi	Acqua potabile	Acqua di scarico	Rifiuti non pericolosi prodotti	Rifiuti non pericolosi recuperati	Rifiuti pericolosi prodotti	Rifiuti pericolosi recuperatii		
Biomasse Italia SpA Strongoli (KR)	4,60E+01		3,92E+05	3,54E+05	11%	4,19E+05	1,65E+04	1,11E+00	2,19E+05	6,26E+04	2,27E+03	3,67E+05	1,59E+04	1,55E+04	6,20E+01	1,58E+01	1,13E+06	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.
Biomasse Crotone SpA Crotone (KR)	2,70E+01		2,52E+05	2,29E+05	11%	2,94E+05		1,16E+00	7,57E+05		1,86E+03	1,64E+05	9,62E+03	9,56E+03	3,20E+01	2,20E+01	7,30E+05	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.
Ecosesto S.p.A. Rende, Cosenza	1,50E+01				11%													
Bonollo Energia SpA Anagni (Fr)	1,00E+01		8,00E+04		11%												2,31E+05	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.
C.E.B. spa Longarone (BL)	6,00E+00		3,30E+04		11%	6,50E+04		1,97E+00									9,54E+04	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.
Linea Green S.p.A Impianto SANT'AGATA DI PUGLIA (Fg)	2,52E+01		1,84E+05		11%												5,32E+05	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.
Linea Green S.p.A Impianto LODI	9,99E+02	5,00E+03	2,24E+04	1,99E+04	11%												6,47E+04	*Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%. *Dato stimato considerando che l'eregia ceduta alla rete è pari all'89% dell'energia totale
Linea Green S.p.A Impianto Cremona	1,00E+03	5,50E+03	4,75E+04	4,23E+04	11%												1,37E+05	*Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%. *Dato stimato considerando che l'eregia ceduta alla rete è pari all'89% dell'energia totale
Mercure Srl Laino Borgo (CS)	4,10E+01		3,15E+05	2,80E+05	11%	3,50E+05		1,11E+00									9,10E+05	*Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%. *Dato stimato considerando che l'eregia ceduta alla rete è pari all'89% dell'energia totale
Sardinia Bio Energy S.R.L. Serramanna (VS)	1,33E+01	4,95E+01	1,00E+05		11%	1,30E+05		1,30E+00									2,89E+05	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.
Zignago Power S.R.L Impianto di Fossalta di Portogruaro (VE)	1,70E+01	4,92E+01	8,14E+04		11%												2,35E+05	*Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%. *Dato stimato partendo dalla Potenza Elettrica dell'impianto (MWh) e il numero di ore medie annuali lavorate (4789) indicate dal GSE (2022)
Zignago Power S.R.L Impianto di Bagnolo di Po	4,00E+00	1,51E+01	1,92E+04		11%												5,54E+04	*Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%. *Dato stimato partendo dalla Potenza Elettrica dell'impianto (MWh) e il numero di ore medie annuali lavorate (4789) indicate dal GSE (2022)
Ital Green Energy S.R.L. Monopoli (BA)	1,20E+01		5,56E+04		11%	1,00E+05		1,80E+00									1,61E+05	*Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%. *Dato stimato partendo dalla Potenza Elettrica dell'impianto (MWh) e il numero di ore medie annuali lavorate (4789) indicate dal GSE (2022)
Sorgenia S.p.A. Argenta (FE)	2,19E+01		1,80E+05		11%												5,20E+05	Il dato è stato stimato ai fini dell'analisi di sensibilità, considerando un rendimento elettrico del 25,7%.

AZIENDA	CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO			PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA - EE (kWh)			ACQUA - flussi annuali (m^3)	BIOMASSE - (t)		CALORE TEORICO PRODOTTO (MWht)	NOTE
	Potenza Elettrica (MWe)	Potenza Termica (MWt)	Rendimento elettrico (%)	EE totale prodotta	EE ceduta	EE autoconsumata		Biomassa t/anno	Biomassa (t)/kWh		
Ecomistral Termovalorizzatore di Spilimbergo	3,44E+03		23%	5,59E+06	3,67E+06	1,87E+06	5,58E+03	1,04E+04	1,86E-03	1,87E+07	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012. *Il rendimento elettrico è stato stimato ipari a 23%, che rappresenta un valore conservativo per gli impiant di piccola taglia.
Termotrezzo TREZZO SULL'ADDA (Milano)	2,02E+04	8,24E+04	25%	6,60E+07	5,47E+07	1,11E+07	4,27E+04	7,42E+04	1,12E-03	2,03E+08	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012.
Herambiente Impianto di Pozzilli (Isernia)	1,15E+04	5,00E+04	23%	4,92E+07	4,41E+07	5,41E+06	2,71E+05	4,50E+04	9,15E-04	1,65E+08	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012.
Herambiente Impianto di Modena	1,86E+04	7,80E+04	24%	6,44E+07	5,61E+07	8,29E+06	3,21E+04	9,69E+04	1,50E-03	2,06E+08	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012.
Herambiente Impianto di Padova	1,83E+04	7,98E+04	23%	5,40E+07	4,22E+07	1,24E+07	6,27E+04	7,87E+04	1,46E-03	1,81E+08	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012.
Gerbido Impianto di Termovalorizzazione - Torino	6,55E+04		27%	2,18E+08	1,84E+08	3,25E+07	6,55E+05	2,85E+05	1,31E-03	5,89E+08	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012. *Rendimento elettrico stimato sulla base del rendimento elettrico d'impiantio di potenza analoga
Acea Ambiente Termovalorizzare di San Vittore del Lazio (Frosinone)	4,40E+04	1,65E+05	27%	1,37E+08	1,18E+08	1,89E+07	4,46E+04	1,57E+05	1,15E-03	3,75E+08	*Si considera Energia Rinnovabile il 51% dell'Energia elettrica prodotta secondo quanto indicato dal D.M. 06/07/2012.

LA FILIERA DELLE BIOMASSE SOLIDE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN ITALIA

Allegato III: Dati secondari utilizzati per lo sviluppo dei dataset

Output: Progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse
Linea di intervento 2: Realizzazione della Banca Dati Italiana LCA
Azione 5: Analisi e raccolta dati per la costruzione della Banca Dati

Processi secondari utilizzati nello studio della filiera energetica delle biomasse solide in Italia

Emissioni locali impianti di trattamento (ISPRA -Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale - 2019)

		CORINAIR ACTIVITY: Commercial and Institutional plants (CODE 020103)	CORINAIR ACTIVITY: Plants in agriculture, forestry and aquaculture (CODE 020302)
		CORINAIR SECTOR: Combustion plants<50 MW	
		wood and similar	**biomass**
Aggregate emission factors	**UNIT**		
CO_2	kg/GJ	94,600	94,600
CH_4	kg/GJ	0,320	0,320
N_2O	kg/GJ	0,014	0,014
NO_x	kg/GJ	0,066	0,066
CO	kg/GJ	4,633	4,633
NMVOC	kg/GJ	0,535	0,535
SO_2	kg/GJ	0,014	0,014
NH_3	kg/GJ	0,005	0,005
PM10	g/GJ	351,941	311,600
PM2.5	g/GJ	347,510	311,600
BC	g/GJ	31,289	31,300
PAH	g/GJ	0,193	0,193
Benzo[α]pyrene	g/GJ	0,058	0,058
Benzo[ß]fluoranthene	g/GJ	0,066	0,066
Benzo[κ]fluoranthene	g/GJ	0,030	0,030
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	g/GJ	0,038	0,038
Diox	µg/GJ	0,368	0,368
PCB	g/GJ	0,000	0,00006
HCB	g/GJ	0,000	0,00001
As	g/GJ	0,000	0,000
Cd	g/GJ	0,001	0,010
Cr	g/GJ	0,003	0,000
Cu	g/GJ	0,005	0,010
Hg	g/GJ	0,000	0,010
Ni	g/GJ	0,002	0,000
Pb	g/GJ	0,034	0,005
Se	g/GJ	0,000	0,000
Zn	g/GJ	0,090	0,190

Flussi/processi secondari	Dataset di riferimento
Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U	<u>Processo di produzione dell'elettricità:</u> adattato dal processo di EcoInvent v. 3.7.1 "*Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U* "(dato secondario). Il dataset originale è stato modificato come segue: il quantitativo di wood chips è stato eliminato perché sono stati usati i dati primari sulle biomasse solide; le emissioni sono state eliminate, perché sono stati usati i dati forniti da ISPRA; il trattamento dei rifiuti è stato eliminato, perché sono stati usati processi specifici per ciascuna tipologia di rifiuto individuato. Il processo è stato rinominato come: ARCADIA_ *Electricity, high voltage {IT}| heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 | Cut-off, U*
Chipping	Scrucca et al. 2021 (Report Arcadia "Studio di filiera – Cippato forestale")
Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 | Cut-off, U	EcoInvent v. 3.7.1: nessuna modifica
Transport freight, sea, container ship {GLO}|market for transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U	EcoInvent v. 3.7.1: nessuna modifica
Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U	<u>Processo di combustione dei rifiuti:</u> Adattato dal processo di EcoInvent v. 3.7.1 "*Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U* "(dato secondario), privandolo delle emissioni in aria. Il processo è stato rinominato come: ARCADIA_ *Biowaste {GLO}| treatment of biowaste, municipal incineration| Cut-off, U*

Per il **trasporto delle biomasse** di origine nazionale (che costituiscono il 90% per la classe CL1 e il 100% della classe CL2), la distanza media (filiera corta), fra il punto di raccolta della biomassa e l'impianto di conversione energetica, è stata ipotizzata pari a 70 km, in accordo con il DM 02/03/2010.

Nel caso del processo CL1, per il restante 10% della biomassa totale utilizzata, la distanza media di trasporto è stata stimata come segue (maggiori dettagli sul trasporto sono riportati nell'Allegato I):

• per l'8% della biomassa, che proviene dall'Europa, è stata considerata la distanza media europea di trasporto delle merci su gomma, che è pari a 543 km, in accordo con i dati ISTAT del 2018 (http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#);
• per il 2% della biomassa (proveniente da USA e Canada) è stato considerato un trasporto sia via mare, che su gomma. Per il trasporto via mare, le distanze sono state calcolate prendendo in considerazione i principali porti commerciali. In particolare, per l'Italia, è stato scelto il porto di Genova che si è posizionato al 2° posto, per quantità di merci sbarcate, nel 2021[6], ed ha una posizione geografica strategica per le navi provenienti da USA e Canada. Invece, per USA e Canada, sono stati selezionati rispettivamente i porti di New York e Montreal, sempre tenendo conto anche della loro posizione geografica strategica. La distanza media in nave (7458,5 km, https://www.searates.com/services/distances-time/) è stata determinata attribuendo alle lunghezze dei due tragitti (New York-Genova e Montreal-Genova) un peso proporzionale alla percentuale di biomassa trasportata. Per il trasporto in Italia su camion, è stata considerata la distanza media nazionale di trasporto delle merci su gomma, che è pari a 125 km, in accordo con i dati ISTAT del 2018 (http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#.

[6] http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSC_TRAMERCIS1#

AGROALIMENTARE

EDILIZIA COSTRUZIONI

ENERGIA

LEGNO ARREDO

ISBN 978-88-8286-515-3

enea.it