



Università degli Studi di Firenze

**DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZA DEL SUOLO E CLIMATOLOGIA**

CICLO XXV

COORDINATORE Prof. Luca Calamai

Strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici:
analisi della sostenibilità di una filiera agroenergetica
nell'ambiente montano dell'Alto Mugello (Toscana)

Settore Scientifico Disciplinare AGR/02

Dottorando

Dott.ssa Anna Maria Vignini

Anna Maria Vignini

Tutore

Prof. Simone Orlandini

Simone Orlandini



Co-tutore

Dott.ssa Anna Dalla Marta

Anna Dalla Marta

Anni 2010/2012

INDICE

1.INTRODUZIONE

1.1 - Il problema climatico, la sostenibilità ambientale e le energie rinnovabili

1.1.1 Il problema climatico	pag. 1
1.1.2 Lo sviluppo sostenibile	pag. 5
1.1.3 Le fonti energetiche rinnovabili	pag. 11
1.1.3.1 Gli obiettivi ambientali al 2020	pag. 11
1.1.3.2 Il settore energetico europeo ed italiano	pag. 14
1.1.3.3 Le energie rinnovabili a livello nazionale e regionale	pag. 16
1.1.3.4 Le energie rinnovabili in prospettiva	pag. 19

1.2 - Le biomasse solide e la filiera legno-energia

1. 2.1 Le biomasse solide	pag. 21
1.2.1.1 Premessa	pag. 21
1.2.1.2 Definizione	pag. 21
1.2.1.3 I processi	pag. 22
1.2.1.4 I biocombustibili	pag. 22
1.2.1.5 Comparti di provenienza	pag. 23
1.2.1.6 Biocombustibili solidi: le biomasse legno-cellulosiche	pag. 24
1.2.1.7 Il valore energetico dei combustibili fossili	pag. 25
1.2.1.8 Principali combustibili solidi	pag. 26
1.2.2 La filiera legno-cippato-energia	pag. 32
1.2.2.1 Utilizzazioni forestali	pag. 33
1.2.2.1.1 Taglio	pag. 33
1.2.2.1.2 Esbosco	pag. 34
1.2.2.1.3 Accatastamento	pag. 35
1.2.2.2 La produzione di cippato	pag. 37
1.2.2.3 La produzione di energia	pag. 40
1.2.3 La cogenerazione e microcogenerazione distribuita	pag. 43

1.3 -La metodologia LCA

1.3.1 LCA: Life Cycle Assessment	pag. 45
1.3.1.1 Cenni storici	pag. 46
1.3.1.2 Definizione di LCA	pag. 48
1.3.1.3 Struttura LCA e fasi	pag. 51
1.3.1.3.1 Prima fase di una LCA: definizione scopi, obiettivi e campo di applicazione (ISO14041)	pag. 54
1.3.1.3.2 Seconda fase di una LCA: analisi di inventario o Life Cycle Inventory-LCI (ISO14041)	pag. 57
1.3.1.3.3 Terza fase di una LCA: la valutazione di impatto o Life Cycle Impact Assessment (ISO 14042)	pag. 61
1.3.1.3.4 Quarta fase di una LCA: interpretazione e miglioramento (ISO 14043)	pag. 67
1.3.1.4 La comunicazione dei risultati di uno studio LCA	pag. 68
1.3.2 LCA nella filiera legno-energia	pag. 69

2. OBIETTIVO DELLA RICERCA

3. MATERIALI E METODI

3.1 -Il software utilizzato SIMAPRO 7.3.3

3.1.1 Le banche dati	pag. 75
3.1.2 Metodi per la valutazione degli impatti	pag. 76
3.1.3 Impatti e danni valutati	pag. 80
3.1.3.1 Metodo ReCiPe	pag. 81
3.1.3.1.1.Categorie di impatti	pag. 81
3.1.3.1.2 Il danno alla salute umana	pag. 83
3.1.3.1.3 Il danno alla qualità dell'ecosistema	pag. 84
3.1.3.1.4 L'esaurimento delle risorse	pag. 85
3.1.3.1.5 La stima del danno	pag. 85
3.1.3.2 Metodo IPCC2007	pag. 86

3.2 - Il caso studio: applicazione della LCA a una filiera legno-energia.	
3.2.1 Descrizione aree di studio	pag. 87
3.2.1.1 Descrizione area di studio forestale	pag. 87
3.2.1.2 Descrizione area di studio zootecnica	pag. 90
3.2.2 Definizione degli scopi, degli obiettivi e del campo di applicazione LCA	pag. 94
3.2.2.1 Scopi ed obiettivi dello studio	pag. 94
3.2.2.2 Campo di applicazione dello studio	pag. 94
3.2.2.2.1 Definizione dell'unità funzionale	pag. 94
3.2.2.2.2 Definizione dei confini di sistema	pag. 95
3.2.2.2.3 Periodo di riferimento	pag. 96
3.2.2.2.4 Definizione del livello di qualità dei dati	pag. 96
3.2.3 Raccolta dei dati (fase di inventario)	pag. 97
3.2.3.1 Raccolta dati della produzione cippato	pag. 98
3.2.3.1.1 Aree sperimentali	pag. 98
3.2.3.1.2 Rilievi produzione cippato	pag. 99
3.2.3.2 Raccolta dati della produzione energia	pag. 103
3.2.3.2.1 Rilievi dei consumi, delle rese, delle emissioni dell'impianto termico	pag. 104

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 – Le differenti fasi della filiera

4.1.1 Fase di taglio	pag. 106
4.1.2 Fase di esbosco	pag. 107
4.1.3 Fase di cippatura	pag. 107
4.1.4 Fase di trasporto del cippato in azienda	pag. 108
4.1.5 Fase di produzione di energia termica	pag. 108

4.2 - Analisi LCA con il metodo ReCiPe

4.2.1 Analisi LCA della filiera legno-energia	pag. 111
4.2.2 Analisi LCA della filiera di riferimento	pag. 117
4.2.3 Confronto analisi LCA tra filiera legno-energia e quella di riferimento	pag. 120

4.2.4 Analisi LCA della filiera legno-cippato tradizionale	pag. 122
4.2.5 Analisi LCA della filiera legno-cippato con processore	pag. 126
4.2.6 Confronto analisi LCA filiera legno-cippato tradizionale ed innovativa	pag. 130
4.3 - Analisi LCA con il metodo IPCC 2007	
4.3.1 Analisi LCA della filiera legno-energia	pag. 132
4.3.2 Analisi LCA della filiera di riferimento	pag. 135
4.3.3 Confronto analisi LCA tra filiera legno-energia e quella di riferimento	pag. 136
4.3.4 Analisi LCA della filiera legno-cippato tradizionale	pag. 137
4.3.5 Analisi LCA della filiera legno-cippato con processore	pag. 139
4.3.6 Confronto analisi LCA filiera legno-cippato tradizionale ed innovativa	pag. 141

5. CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

RINGRAZIAMENTI

1. Introduzione

1.1 - Il problema climatico, la sostenibilità ambientale e le energie rinnovabili

1.1.1 - Il problema climatico

L'effetto serra è un fenomeno naturale legato alla caratteristica di alcuni gas componenti l'atmosfera di essere "trasparenti" alla radiazione solare che arriva e di "intrappolare", invece, la radiazione emessa dalla terra che ha lunghezza d'onda maggiore (raggi infrarossi). Il fenomeno, noto da molto tempo, fu ben descritto già nel 1896 dal chimico svedese Arrhenius che in una sua pubblicazione parlò anche dell'esistenza del fenomeno del riscaldamento globale o "effetto serra" causato dall'innalzamento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera e ipotizzò che un raddoppio della sua concentrazione, per via dell'impiego di combustibili fossili, avrebbe aumentato la temperatura terrestre di 5-6 °C (Arrhenius, 1896). All'epoca non fu compresa la rilevanza e l'impatto di tali variazioni ma oggi l'importanza dei cambiamenti climatici e la necessità di arginare gli effetti è stata riconosciuta a livello mondiale. Le emissioni di gas ad effetto serra (GHG_S) e il loro impatto sull'ambiente sono diventati un tema d'interesse nazionale ed internazionale mettendo in evidenza le criticità del sistema economico affermatosi negli ultimi decenni e spingendo ad una riflessione approfondita sull'opportunità di integrarlo con altri schemi di sviluppo anche alla luce dell'attuale crisi energetica e finanziaria.

I cambiamenti delle quantità di gas e aerosol ad effetto serra nell'atmosfera, della radiazione solare e delle proprietà della superficie terrestre alterano il bilancio energetico del sistema climatico. Questi cambiamenti sono espressi in termini di forzante radioattivo, termine che viene usato per valutare come i fattori antropici e naturali influenzino la tendenza al riscaldamento o al raffreddamento del clima globale.

L'ultimo *Fourth Annual Report (AR4) dell'Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, 2007)* indica che, nel periodo dal 1970 al 2004, le emissioni di gas ad

effetto serra, espressi in termini di biossido di carbonio equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), sono notevolmente aumentate.

Il loro aumento è stato del 70% (figura 1.a) e solamente quello della CO_2 , il principale gas serra di natura antropica, è stato dell'80% passando da 21 a 38 gigatonnellate (Gt). La fonte principale dell'incremento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica, rispetto al periodo pre-industriale, deriva dall'uso di combustibili fossili (56% del totale) e dai cambiamenti di uso del suolo, anche se questi ultimi apportano un contributo minore ma pur sempre significativo (figura 1.b).

Complessivamente, tra i vari settori produttivi, quelli che maggiormente hanno determinato la crescita del livello di emissioni antropogeniche di gas serra nel periodo 1970-2004 sono stati il settore industriale, il settore dei trasporti e della produzione di energia. Quest'ultimo nel 2004 ha inciso per una quota pari quasi al 26% del totale, il settore agricolo e forestale hanno contribuito in misura di circa il 30% (figura 1.c).

Il peso dell'Italia rispetto alle emissioni globali è di circa il 2% e la CO_2 fornisce il contributo maggiore. Nel 1990, anno di riferimento della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite (UNFCCC), l'Italia ha emesso 518,5 megatonnellate (Mt) di $\text{CO}_{2\text{eq}}$, costituite, senza contare gli assorbimenti per l'uso del suolo, per l'84,4% da CO_2 , per il 7,8% da CH_4 , per il 7,7% da N_2O (Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, 2002).

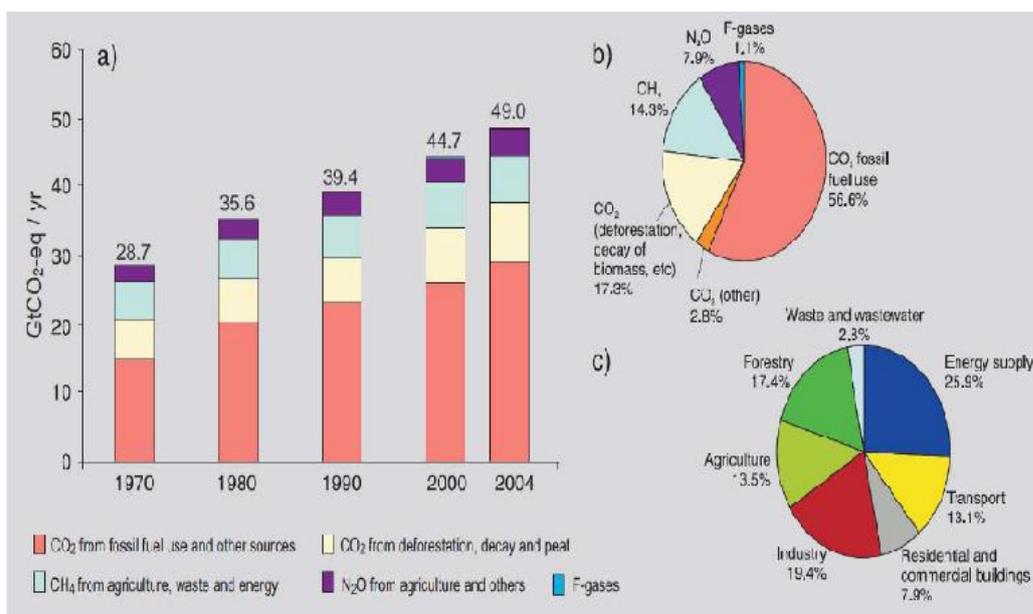


Fig. 1. a) Emissioni antropogeniche globali di gas serra 1970-2004; b) Quote di gas serra 1970-2004; c) Quote per settore nel 2004 (da: IPCC- Climate Change 2007- Synthesis Report)

Secondo le stime della International Energy Agency (IEA, 2008) si potrà arrivare nel 2050 ad un incremento nel livello globale di emissioni di CO₂ provenienti da combustione di fonti energetiche fossili del 130% rispetto al 2005, corrispondente ad un tasso di crescita medio annuo pari all'1,8%, tra il 2005 ed il 2030, e pari al 2% nel successivo ventennio 2030-2050. Questo peggioramento del livello di emissioni di CO₂ potrà causare, secondo le valutazioni dell' IPCC, un innalzamento della temperatura globale media di circa 6 gradi centigradi (°C), dovuto soprattutto all'avanzamento economico dei paesi in via di sviluppo che non può prescindere da un aumento dei consumi energetici (IPCC, 2007).

E' infatti previsto un aumento del consumo complessivo di energia primari in misura dell'1,8% l'anno fino al 2030. Particolare preoccupazione suscita il forte aumento del consumo di carbone (+4,5%) e di gas naturale (+3,1%). Il consumo di fonti rinnovabili ed in particolare di energia proveniente dalle biomasse è anch'esso in crescita in termini relativi (+4,7%) tuttavia, il totale consumo di bioenergia, se si eccettua il consumo di legna da ardere nei paesi in via di sviluppo, risulta essere inferiore all'incremento del consumo di carbone nell'ultimo anno considerato 2007 (IEA, 2007).

L'incremento delle emissioni climalteranti determina un aumento dell'intensità delle manifestazioni dei cambiamenti climatici.

Tali manifestazioni sono essenzialmente riconducibili alle variazioni delle tendenze dei fattori climatici (temperatura medie dell'aria e degli oceani, scioglimento diffuso di neve e ghiacciai, innalzamento del livello del mare medio mondiale, variazioni delle quantità delle precipitazioni, della salinità dell'oceano e delle strutture dei venti) e all'aumento della variabilità meteo-climatica con incremento in termini di intensità, persistenza e frequenza di alcune manifestazioni climatiche note come eventi estremi (ondate di calore, precipitazioni intense, intensità dei cicloni tropicali, periodi siccità, gelate, ecc..).

Per quanto riguarda le variazioni degli andamenti dei parametri meteorologici dal 4° rapporto dell'IPCC emerge che l'aumento della temperatura negli ultimi 100 anni (1906-2005) è stato di 0,74 °C, un incremento più elevato rispetto allo 0,60 °C del periodo 1901-2000 (IPCC, 2007).

Nel corso degli ultimi anni il trend planetario del riscaldamento globale è continuato senza mostrare segni di rallentamento, evidenziando al contrario una significativa

accelerazione. In molti casi le previsioni elaborate nei modelli, anche i più recenti come quelli contenuti nel 4° rapporto dell'IPCC, si sono rivelate errate per difetto.

Per quanto riguarda le temperature, tutte le decadi che è possibile arbitrariamente scegliere tra il 1990 e il 2008 hanno mostrato incrementi medi compresi tra 0,17 e 0,34 °C (l'ultima, 1999-2008, una variazione di 0,19 °C). I dati del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2010), relativi agli anni più recenti ed i cui ultimi aggiornamenti arrivano a coprire il mese di agosto 2010, mostrano in modo oggettivo ed inequivocabile il trend del processo di riscaldamento globale (*global warming*).

L'insieme dei due primi quadrimestri del 2010 è stato il più caldo mai registrato sia come media globale planetaria (comprensiva di terre emerse ed oceani), sia come media continentale complessiva, sia come media continentale dell'emisfero nord, superando i precedenti record risalenti, rispettivamente, al 2002 (media globale) e al 2007 (medie continentali).

Le temperature medie superficiali degli oceani, dopo aver aggiornato nel 2009 i nuovi record per tre mesi consecutivi (giugno, luglio, agosto), hanno fatto registrare nel 2010 il secondo livello mai raggiunto dal 1880.

Per quanto riguarda la zona artica, un'ampia serie di rilevazioni satellitari e di altre tipologie di misurazione (ad esempio carotaggi) mostrano che le calotte glaciali in Antartide e in Groenlandia si stanno assottigliando a ritmi crescenti. Lo scioglimento stagionale dei ghiacci artici, tra il 2007 ed il 2009, è stato del 40% superiore a quanto originariamente previsto, comportando la minima copertura mai registrata. In conseguenza di questi marcati fenomeni, anche la crescita media annua del livello degli oceani (pari a 3,4 mm negli ultimi 15 anni) è risultata di circa l'80% superiore alle stime.

La concentrazione di CO₂ nell'atmosfera risulta attualmente pari a circa 390 parti per milioni (ppm) con un ritmo di crescita (in aumento) di 2,5 ppm annue (Enea, 2010).

In Italia, le analisi delle serie storiche mostrano significativi aumenti della temperatura media annua (0,4 °C al Nord, 0,7°C al Sud) e una tendenziale, anche se non sempre significativa, riduzione delle precipitazioni annue (-5%), in particolare nell'Italia meridionale (Bartolini et al., 2008). A questo proposito occorre dire che se per la temperatura gli studi mostrano in maniera univoca la tendenza all'aumento, più controversa è la determinazione delle variazioni del regime pluviometrico. Alcuni

studiosi hanno mostrato un aumento delle precipitazioni medie annue nelle regioni con latitudine superiore a 45° N e una diminuzione alle medie latitudini (35-40°N) con un decremento dei giorni piovosi, -10 a livello nazionale, (Brunetti et al., 2006). In Italia, le previste modifiche del regime pluviometrico indicano pertanto un aumento delle precipitazioni nel centro nord e una diminuzione al sud.

Contemporaneamente, negli ultimi anni, si è registrata una maggiore variabilità meteo-climatica con incremento in termini di frequenza ed intensità degli eventi “estremi”, come, ad esempio, l’aumento del numero di precipitazioni intense e l’aumento della frequenza dei giorni con piena (Bartolini et al., 2011).

In Toscana l’analisi dei trend climatici dedotti dallo studio delle serie temporali di temperatura e precipitazione sulla regione, evidenzia un aumento delle temperature, massime e minime, dell’ordine di quasi 2°C in poco più di 40 anni, con una evidente impennata negli ultimi 20-25 anni (tale segnale di crescita è visibile in tutte le stagioni) e una generale diminuzione delle precipitazioni medie areali durante tutto il periodo, che sembra essere dovuta soprattutto a una diminuzione repentina avvenuta all’inizio degli anni ’80 (Lamma, 2009).

In Toscana la temperatura media regionale del 2009 è stata pari a 14,3 °C, superiore di 0,4°C alla temperatura media dell’anno precedente e di 0,6 °C della media dei tredici anni precedenti (ARSIA, 2009)

Dall’analisi svolta dall’Istituto di Biometeorologia del Centro di Ricerca Nazionale di Firenze sugli ultimi 100 anni risulta che, a partire dagli anni 60, si è avuto un notevole incremento delle piogge intense primaverili, specialmente nell’area settentrionale della regione, in quanto sono più che raddoppiate negli ultimi 20 anni. Ugualmente sembrano aumentati i giorni di siccità soprattutto nel periodo invernale, sempre negli ultimi 20 anni, in misura di circa il 30%.

1.1.2 - Lo sviluppo sostenibile

Verso la fine degli anni Ottanta del secolo scorso, per la prima volta nella storia dell’umanità, la richiesta di risorse naturali ha superato la capacità di rigenerazione, e si è determinato così uno squilibrio che impedisce tuttora alla biosfera di rigenerarsi allo stesso ritmo con il quale viene consumata (tale percentuale di “consumo” è andata aumentando, fino a superare, nel 1999, il valore del 120%). La consapevolezza che ciascuna attività dell’uomo comporta un’alterazione del fragile e complesso equilibrio

del pianeta ha spinto, negli ultimi anni, a una valutazione della singola attività o del singolo processo in termini di sviluppo sostenibile ovvero in termini di impatti complessivi come, per esempio, sulla disponibilità delle risorse naturali, sui cambiamenti climatici, sull'uso del suolo, sulla salute umana ma anche sulla dignità e libertà umana.

Il concetto di sviluppo sostenibile ruota infatti intorno a quattro componenti fondamentali (figura 2):

- *Sostenibilità economica*: intesa come capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione.
- *Sostenibilità sociale*: intesa come capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione) equamente distribuite per classi e genere.
- *Sostenibilità ambientale*: intesa come capacità di mantenere qualità e riproducibilità delle risorse naturali.
- *Sostenibilità istituzionale*: intesa come capacità di assicurare condizioni di stabilità, democrazia, partecipazione, giustizia.

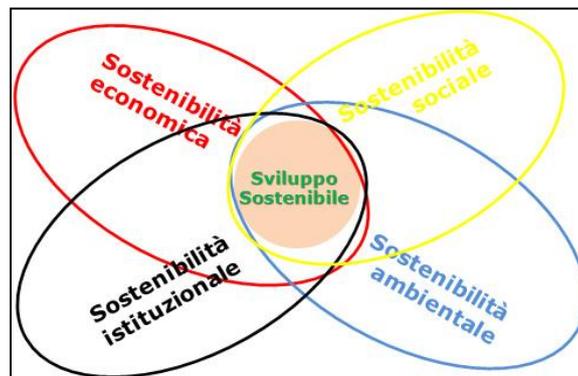


Fig.2 Le componenti dello sviluppo sostenibile

Il concetto di sviluppo sostenibile è stato portato alla notorietà internazionale dal rapporto Brundtland (WCED, 1987) in cui si parla di sviluppo sostenibile e dei cambiamenti politici necessari ad ottenerlo; in particolare nel rapporto si sostiene che: “l’umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che esso soddisfi i bisogni dell’attuale generazione, senza compromettere la capacità di quelle future di rispondere ai loro”.

La *Conferenza delle Nazioni Unite* su ambiente e sviluppo, tenutasi a *Rio de Janeiro*

nel 1992, ha affermato che la sostenibilità comporta non solo una riduzione dell'uso delle risorse tale da garantire il mantenimento per le generazioni future, ma anche una uguale possibilità di accedervi da parte di tutti i popoli della terra (UNFCCC, 1992). Dalla Conferenza di Rio de Janeiro sono scaturite due iniziative di rilievo: programma d'azione locale Agenda 21, un ampio e articolato manuale per lo sviluppo del pianeta fino al 21° secolo, e la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici ovvero il primo strumento legale vincolante sui cambiamenti climatici che si pone come obiettivo la stabilizzazione delle concentrazioni in atmosfera dei gas serra derivanti dalle attività umane.

Dalla *Conferenza di Kyoto* (11 dicembre 1997 e in vigore dal 2005) si evince come il ricorso alle fonti di energia rinnovabile si imponga quale scelta obbligata per la riduzione e il contenimento dei gas ad effetto serra, CO₂ in primis, il protocollo prevede l'obbligo per i paesi industrializzati aderenti di operare una riduzione, nel periodo 2008-2012, delle emissioni di elementi inquinanti in misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990. Uno sviluppo energetico sostenibile a livello ambientale si persegue attraverso la promozione, il ricorso e la diffusione di energie rinnovabili, la riduzione di combustibili fossili, l'ideazione di tecnologie di conversione più efficienti, un incremento del risparmio energetico e una riduzione della deforestazione (UN, 1997).

Al Vertice mondiale sullo sviluppo sostenibile di Johannesburg del 2002 si enuncia “che sradicare la povertà, cambiare i modelli di consumo e produzione insostenibili e proteggere e gestire le risorse naturali - basi per lo sviluppo sociale ed economico-sono contemporaneamente gli obiettivi fondamentali ed i presupposti essenziali per lo sviluppo sostenibile”. Dal vertice emerge che la crescita economica non è alla base dello sviluppo, che occorre distinguere tra crescita e sviluppo e che per uno sviluppo sostenibile occorre considerare l'aspetto sociale, economico ed ambientale. Nella piramide dei valori il pilastro sociale è al vertice ma, comunque, nessuno aspetto può essere considerato a sé stante (Vertice mondiale di Johannesburg, 2002).

La consapevolezza dell'importanza di scelte politiche a favore di uno sviluppo sostenibile ha portato nel vertice del G8, che ha avuto luogo in Giappone nel luglio 2008, alla sottoscrizione da parte di tutti i paesi partecipanti un impegno a ridurre le emissioni di gas serra del 50% entro il 2050 anche se tale impegno non prevede né

quantità né scadenze e non raccoglie l'adesione di paesi emergenti come Cina ed India.

Dopo la delusione per i mancanti passi in avanti della 15° Conferenza ONU sul clima (Cop15) di Copenhagen, alla Conferenza di Cancun i Governi firmatari del Protocollo di Kyoto hanno riconosciuto il divario tra i loro deboli attuali impegni e quelli necessari per mantenere la temperatura globale sotto i due gradi centigradi rispetto all'epoca preindustriale, stabilendo che bisognerà tagliare le emissioni di gas serra dal 20% al 40% nel 2020, rispetto al 1990. Il piano resta però circoscritto al club di Kyoto escludendo così dallo sforzo gli Stati Uniti che non hanno mai sottoscritto il Protocollo oltre a Cina e India che, pur avendo sottoscritto l'intesa, possono operare in regime di deroga (UNFCCC, 2010).

I negoziati della 17° Conferenza ONU sul clima tenutesi nel novembre 2011 a Durban, in Sud Africa, hanno dato avvio ad un nuovo processo, che si concluderà nel 2015 ed entrerà in vigore nel 2020, che sfocerà in un nuovo trattato sul clima giuridicamente vincolante (nel frattempo si prolungherà il protocollo di Kyoto fino al 2017). Questo trattato non farà più una distinzione tra Paesi industrializzati e Paesi in via di sviluppo, come finora, ma obbligherà tutti a ridurre le proprie emissioni in base alla quantità di gas ad effetto serra emesse e alla loro possibilità e identificare le azioni per colmare il divario fra l'impegno di riduzione delle emissioni per il 2020 e l'obiettivo di mantenere il riscaldamento globale sotto i due gradi (UNFCCC, 2011).

Oggi, quindi, possiamo dire che è consolidata l'esigenza comune di attivare strategie globali per uno sviluppo sostenibile e per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici riducendo le emissioni di gas ad effetto serra; tuttavia, per questioni prevalentemente politiche, restano difficoltà a quantificare le riduzioni di emissioni spettanti a ciascun paese, sia a quelli che hanno aderito al Protocollo di Kyoto sia per i Paesi firmatari della 17 Conferenza delle parti della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti climatici e il riscaldamento globale.

A livello europeo, a seguito dell'elaborazione del VI piano di azione Ambientale Unione Europea 2002/2010, (Commissione Europea, 2001) il Consiglio di Göteborg del 2001 ha adottato la prima strategia in materia di Sviluppo Sostenibile, completata nel 2002. La strategia comunitaria per lo sviluppo sostenibile delinea una tabella di marcia per l'attuazione dello sviluppo sostenibile nell'Unione e tocca gli aspetti economici, sociali, ambientali e finanziari nonché la coerenza delle politiche

comunitarie e della governance a tutti i livelli, compreso il controllo della mondializzazione, la lotta contro la povertà e la promozione dello sviluppo sociale, la gestione sostenibile delle risorse naturali e ambientali, la migliore governance a tutti i livelli e il finanziamento dello sviluppo sostenibile (Consiglio Europeo di Goteborg, 2001).

A conclusione del percorso che aveva visto nel 2005 il riesame della strategia europea per lo sviluppo sostenibile del 2001, e sulla base delle consultazioni avvenute con gli altri organismi comunitari e altri stakeholders, il Consiglio europeo ha adottato, il 16 giugno 2006, una nuova strategia europea per lo sviluppo sostenibile, l'Agenda di Goteborg, per un' unione europea allargata.

La strategia sottolinea e rinforza l'impegno e la necessità di cooperazione che dovrà affrontare l'UE in considerazione dell'impatto dei nuovi paesi sullo sviluppo sostenibile globale. L'adozione di tale strategia rappresenta un atto di grande rilevanza, poiché l' unione europea si pone la finalità ambiziosa di integrare gli obiettivi di sostenibilità ambientale con quelli di sviluppo economico e sociale che caratterizzano l'altra strategia comunitaria prioritaria, l'Agenda o Strategia di Lisbona (definita "motore di un'economia più dinamica") approvata nel 2000. In tal senso, il documento propone di realizzare sinergie, ma non esplicita le modalità attraverso cui poterle realizzare. La nuova strategia elenca sette sfide e relativi target e azioni: cambiamento climatico ed energia; trasporti sostenibili; produzione e consumi sostenibili; conservazione e gestione delle risorse naturali; salute pubblica; inclusione sociale, demografia e immigrazione; povertà globale e sfide dello sviluppo sostenibile globale. Un tema cui presta, inoltre, nuova attenzione è quello della produzione e dei consumi sostenibili. Un ruolo fondamentale a sostegno della diffusione e del raggiungimento degli obiettivi della strategia è assegnato alla formazione, al maggior investimento nella ricerca e sviluppo, all'Agenda 21 Locale, alla informazione e comunicazione con i cittadini (Consiglio Europeo di Goteborg, 2006).

Concretamente, per favorire l'applicazione di soluzioni innovative a favore di produzioni sostenibili l'Unione Europea ha costituito i partenariati europei per l'innovazione come, ad esempio, quello relativo alla "Produttività e la sostenibilità dell'agricoltura".

Per accrescere la produttività e la competitività dell'agricoltura è necessario innanzitutto un uso più efficiente delle risorse, per riuscire a produrre con meno

acqua, meno energia, meno fertilizzanti (soprattutto fosforo e azoto) e meno pesticidi. Tale obiettivo richiede anche un uso più massiccio di fonti energetiche rinnovabili e la riduzione dei rifiuti.

La sostenibilità richiede una riduzione dell'inquinamento per proteggere la qualità delle acque e la funzionalità dei suoli, oltre alla salvaguardia della biodiversità e alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra. Il terreno rivestirà particolare importanza, perché è l'elemento attraverso il quale sarà misurato il successo o il fallimento dell'adozione di modelli di produzione più sostenibili. Una gestione adeguata del suolo deve riuscire a evitarne il degrado e l'erosione, a stabilizzare le funzioni che esso svolge e contribuire all'adattamento ai cambiamenti climatici e alla loro attenuazione. (Commissione Europea, 2012).

A livello nazionale l'Italia ha recepito l'orientamento delle politiche ambientali europee con delibera del Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE) del 2002 ed ha emanato il primo Piano Nazionale per lo sviluppo sostenibile.

In particolare è stata approvata, oltre alla convenzione sui mutamenti climatici e a quella sulla biodiversità, l'Agenda 21 che individua le diverse azioni da avviare nella direzione dello sviluppo sostenibile in vista del XXI secolo. L'Agenda 21 ha come obiettivo quello di assicurare uno sviluppo economico responsabile verso la società, proteggendo le risorse naturali e l'ambiente a beneficio delle future generazioni. Per dare attuazione all'Agenda 21 il Piano prevede azioni nei settori produttivi quali l'industria, l'agricoltura ed il turismo, nella infrastrutture di base (energia e trasporti) e nel settore dei rifiuti, problema terminale nei processi di produzione e consumo nelle economie più ricche. "La necessità - recita l'Agenda - di limitare le emissioni atmosferiche di gas ad effetto serra e di altri gas e sostanze richiederà in maniera crescente di essere basata sull'efficienza nelle attività di produzione, trasmissione, distribuzione e consumo dell'energia, e su un crescente affidamento sui sistemi energetici sostenibili, quali in particolare le fonti nuove e rinnovabili di energia" (Ministero dell'ambiente, 1993).

Nel 2002, il CIPE ha approvato la Strategia Nazionale per lo sviluppo sostenibile che per il decennio 2002-2012 individua i principali obiettivi ed azioni per quattro aree prioritarie:

- cambiamenti climatici e protezione della fascia dell'ozono;
- protezione e valorizzazione sostenibile della natura e della biodiversità;
- qualità dell'ambiente e qualità della vita negli ambienti urbani;
- prelievo delle risorse e produzione di rifiuti.

Tra gli strumenti d'azione, la strategia prevede:

- l'integrazione del fattore ambientale in tutte le politiche di settore, a partire dalla valutazione ambientale di piani e di programmi;
- l'integrazione del fattore ambientale nei mercati, con la riforma fiscale ecologica nell'ambito della riforma fiscale generale, la considerazione delle esternalità ambientali e la revisione dei sussidi esistenti;
- il rafforzamento dei meccanismi di consapevolezza e partecipazione dei cittadini;
- lo sviluppo dei processi di Agenda 21 locale;
- l'integrazione dei meccanismi di contabilità ambientale nella contabilità nazionale (Strategia d'azione ambientale per lo sviluppo sostenibile in Italia, 2002).

Secondo la legge italiana "Ogni attività umana giuridicamente rilevante ai sensi del presente codice deve conformarsi al principio dello sviluppo sostenibile, al fine di garantire all'uomo che il soddisfacimento dei bisogni delle generazioni attuali non possa compromettere la qualità di vita e le possibilità delle generazioni future" (Camera dei Deputati, 2006).

1.1.3 - Le fonti energetiche rinnovabili

1.1.3.1 Gli obiettivi ambientali al 2020

Al fine di promuovere lo sviluppo sostenibile risultano fondamentali tutte le azioni per mitigare l'alterazione del clima e favorire processi sostenibili, tra cui il cambiamento del sistema di approvvigionamento energetico, che dovrà dipendere sempre meno da combustibili di origine fossile in favore delle fonti energetiche rinnovabili, il miglioramento dell'efficienza energetica e il risparmio nell'uso delle risorse.

Oltre agli accordi internazionali che tracciano le linee-guida per il perseguimento di tale obiettivo, l'Unione Europea ha emanato varie direttive per favorire la riduzione delle emissioni e la promozione delle energie alternative.

In particolare, l'UE ha emanato la direttiva chiamata "20-20 by 2020" (Commissione Europea, 2008) che prevede la riduzione del 20 per cento, rispetto ai livelli del 1990, delle emissioni di gas a effetto serra, il raggiungimento della quota di fonti rinnovabili del 20 per cento rispetto al consumo finale lordo e il miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia del 20 per cento:

Nel 2009 l'unione europea ha emanato la direttiva 28 del 2009 (Unione Europea, 2009) sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti nazionali che fissa alcuni obiettivi vincolanti per ciascuno degli Stati membri relativamente al ricorso alle fonti rinnovabili. Tali obiettivi sono calcolati secondo la metodologia e le definizioni fissate dal regolamento CE n.1099/2008 del Parlamento europeo e del Consiglio del 22 ottobre 2008, relativo alle statistiche sull'energia; sono calcolati con riferimento al 2005, assunto come anno base rispetto al quale vengono presentati gli aumenti o le riduzioni sia nelle quote di energia prodotta da fonti rinnovabili che delle emissioni di gas serra.

In Italia nel 2005 la quota di fonti rinnovabili è risultata pari al 5,2 % e l'obiettivo da raggiungere è fissato al 17% (questo significa che nel 2020 il consumo finale di energie rinnovabili dovrà attestarsi a 22,31 Mtep). Per quanto riguarda gli altri Paesi, la quota di partenza e la quota obiettivo sono rispettivamente: Germania 5,8 e 18%; Spagna 8,7 e 20 %; Francia 10,3 e 23 %; Polonia 7,2 e 15 %; Regno Unito 1,3 e 15 % (figura 3).

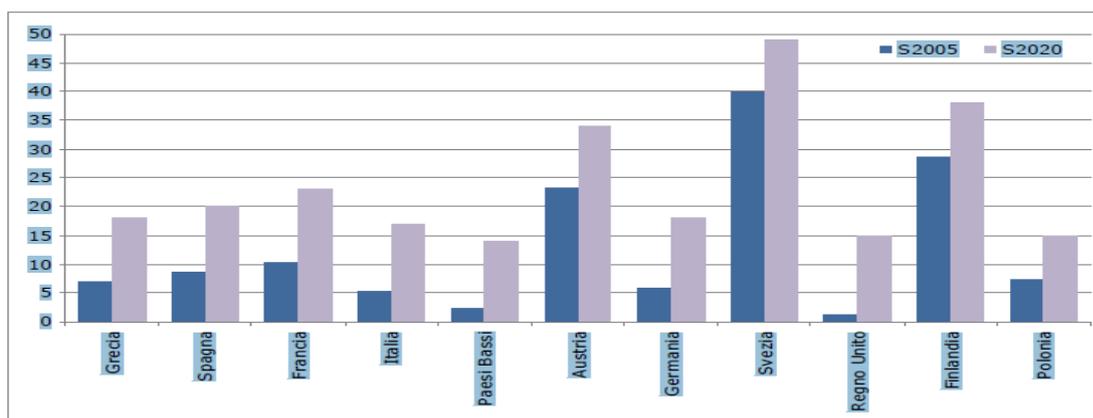


Fig. 3 Obiettivi nazionali per la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale di energia nel 2020 per alcuni paesi dell'unione europea. Legenda: S2005 = quota di energia da fonti rinnovabili al 2005 sul consumo finale di energia; S2020 = obiettivo per la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale di energia al 2020) (da: Eurostat, Energy Statistics).

Per raggiungere più agevolmente l'obiettivo prefissato, l'Europa e, quindi, l'Italia, stanno promuovendo ed incoraggiando l'efficienza e il risparmio energetico (Commissione Europea 2011; Ministero dello Sviluppo economico, 2011).

Anche per gli obiettivi che riguardano la riduzione delle emissioni di gas serra si fa riferimento al 2005, anno per il quale si dispone di dati affidabili e verificati sia per il sistema comunitario ETS (emissioni verificate a livello di impianto) sia per le emissioni di gas serra complessive degli Stati membri comunicate nell'ambito della convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici.

In Italia, l'obiettivo del 14% in meno rispetto al 2005 dovrà essere raggiunto tramite riduzioni del 21 % delle emissioni relative al settore ETS e del 13 % delle emissioni relative al settore non-ETS. I settori ETS, nello specifico quelli di produzione di elettricità da combustione, produzione di cemento, produzione di materiali ceramici, vetro e carta, raffinerie di petrolio e acciaierie, producono grandi quantitativi di CO₂. Alcuni settori non-ETS rilevanti sono il trasporto stradale, marittimo, aereo e l'agricoltura (ISTAT, 2010).

La normativa europea citata è stata recepita a livello nazionale nel 2010 dal Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili in cui si evidenzia che: "L'Italia ha posto da tempo lo sviluppo delle fonti rinnovabili tra le priorità della sua politica energetica, insieme alla promozione dell'efficienza energetica. Gli obiettivi di una tale strategia sono: sicurezza dell'approvvigionamento energetico, riduzione dei costi dell'energia per le imprese e i cittadini, promozione di filiere tecnologiche innovative, tutela ambientale (riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti), e quindi, in definitiva, sviluppo sostenibile". Per raggiungere gli obiettivi risulterà necessario incrementare lo sfruttamento dei potenziali disponibili nel Paese, con particolare riferimento all'utilizzo delle fonti rinnovabili per riscaldamento/raffrescamento ed all'uso dei biocarburanti nel settore trasporti (Ministero dello Sviluppo Economico, 2010).

In questo contesto le colture energetiche dovrebbero assumere un importante ruolo, già nel breve-medio periodo, nella sostituzione dei combustibili fossili, con investimenti sempre crescenti di superficie coltivata, fino a coprire diversi milioni di ettari in Europa verso il 2020 (Commissione Europea, 2005).

Tuttavia, il passaggio dei terreni agricoli a sistemi no food è oggetto di dibattito nella politica mondiale, in primis per i dubbi etici legati alla sicurezza

dell'approvvigionamento di cibo e il possibile ruolo che le colture agro-energetiche possono giocare sull'andamento dei prezzi, nonostante diversi studi abbiano mostrato che una larga quota di terreni oggi utilizzati per colture tradizionali potranno essere destinati a colture no food senza conseguenze significative sull'andamento dei prezzi alimentari (Smeets et al., 2007). In secondo luogo, sebbene le conoscenze sulle colture da biomassa siano in continuo avanzamento, l'impatto ambientale in termini di riduzione delle emissioni di queste colture è ancora da chiarire. Inoltre occorre tener conto anche delle altre esternalità prodotte nelle diverse fasi delle filiere agroenergetiche (lisciviazione di azoto, produzione di polveri sottili ecc...).

Per tutte queste ragioni è auspicabile, per poter conseguire gli obiettivi fissati al 2020, valorizzare le potenzialità energetiche dei territori e favorire la o le fonti rinnovabili disponibili.

1.1.3.2 Il settore energetico europeo ed italiano

L'Unione Europea non arriva a produrre nemmeno la metà dell'energia che consuma. È quindi costretta a importare dall'estero circa il 54 % del proprio fabbisogno, una percentuale che sembra destinata a salire fino al 70 % nel 2030. Il petrolio rappresenta la fetta più consistente delle importazioni totali di energia (60%) seguito dal gas (26%) e dal carbone (13%), mentre le risorse rinnovabili e l'elettricità si attestano sotto all'1% (Eurostat, 2011).

L'UE ha incrementato fortemente le importazioni di petrolio (+10% dal 1995 al 2005) e di gas naturale (+58% nello stesso periodo). Nella decade il tasso totale di dipendenza energetica dei 27 Stati membri dell'UE è aumentato del 9%.

Il contributo delle energie rinnovabili sul totale del consumo interno lordo è passato da dal 5,1% nel 1995 al 6,7% nel 2005 con una crescita relativa del 31%. Nel 2006 la biomassa ha rappresentato un quota predominante (68%) sul totale dell'energia da fonti rinnovabili.

La dipendenza energetica dall'estero non costituisce di per sé un serio problema, ma tende a esserlo nella misura in cui, in un contesto di crescente competitività globale, le risorse energetiche si concentrano in pochi paesi produttori, o di transito, retti da regimi politici relativamente instabili o non democratici. Non è questo il caso del carbone, le cui riserve, oltre ad essere distribuite in modo più regolare, sono stimate dall'Agenzia Internazionale per l'Energia sufficienti a soddisfare il fabbisogno del

pianeta (all'attuale livello di consumo) per almeno 180 anni. La crescente dipendenza dalle importazioni di petrolio e gas naturale è invece all'origine delle preoccupazioni relative alla sicurezza degli approvvigionamenti.

Benché, in termini aggregati, la dipendenza dalle importazioni di gas e petrolio sia relativamente alta, la situazione varia da paese a paese: l'Italia, l'Irlanda, il Portogallo e la Spagna importano più dell'80% (Senato della Repubblica, 2009).

Nell'ultimo decennio il settore energetico nazionale è stato interessato da significativi cambiamenti avvenuti in ambito istituzionale e di mercato, che hanno avuto come obiettivo la riforma del mercato elettrico e del gas, lo sviluppo delle fonti rinnovabili, la promozione dell'efficienza, del risparmio energetico e della sicurezza degli approvvigionamenti.

L'Italia rispetto agli altri Paesi dell'Unione europea si contraddistingue per una maggiore vulnerabilità dal lato degli approvvigionamenti e per una maggiore dipendenza dagli idrocarburi, soprattutto nella generazione elettrica; di contro presenta un minore contenuto di energia per unità di Pil rispetto ad altri Paesi.

Dal 1995 al 2005 la disponibilità interna lorda di energia, definita come la quantità di energia prodotta all'interno del Paese più quella importata al netto delle esportazioni e delle variazioni delle scorte, è sempre stata in crescita, ma dal 2005 al 2009 si è rilevata una inversione di tendenza, particolarmente accentuata nell'anno 2008.

L'analisi del contributo delle singole fonti al soddisfacimento della domanda energetica del Paese mostra che, nel 2009, la quota prevalente è dovuta ai prodotti petroliferi (41,0%), seguiti da gas naturale (35,5%), fonti rinnovabili (10,7%) e combustibili solidi (7,4%). Rispetto all'anno precedente la disponibilità di energia da fonti rinnovabili è aumentata di 1,8 punti percentuali, mentre è diminuita di 0,9 punti quella di gas naturale e di 1,3 punti quella da combustibili solidi; non si registrano variazioni nella quota da petrolio.

Rispetto al 2000 risulta essere più evidente il processo di sostituzione tra le fonti, in particolare tra prodotti petroliferi e gas naturale: la quota di disponibilità di energia da petrolio è notevolmente diminuita (-8,5 %), mentre la quota da fonti rinnovabili è salita del 3,8 % e quella da gas naturale è aumentata del 4,1%. Risultano stabili le quote di combustibili solidi e energia elettrica.(ISTAT, 2010).

1.1.3.3 Le energie rinnovabili a livello nazionale e regionale

Le energie da fonti rinnovabili, definite da molti per convenzione energie rinnovabili, sono quelle derivate dall'utilizzo di materiali naturali che sono inesauribili. Le energie rinnovabili sono cioè quelle fonti energetiche che si rigenerano almeno alla stessa velocità con cui le si usano, ed hanno un impatto ambientale minore rispetto alle energie tradizionali. Quelle tradizionali sono, invece, generate da fonti esauribili e in quanto tali disponibili in quantità definita, per quanto ingenti possano essere le scorte, come i combustibili fossili (carbone, petrolio, gas, uranio). Le direttive europee (2001/77/CE e 2003/30/CE) riconoscono come "fonti energetiche rinnovabili" le seguenti fonti non fossili: eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas.

Rispetto alla direttiva del 2003, la più recente direttiva 2009/28/CE, recepita nel nostro Paese con il Dlgs 3 marzo 2011, n. 28, ha aggiunto e definito due nuovi fonti energetiche: l'energia "aerotermica" ovvero l'energia accumulata nell'aria ambiente sotto forma di calore e l'energia "idrotermica" cioè l'energia immagazzinata nelle acque superficiali sotto forma di calore. Inoltre il Dlgs n. 28/2011, nel recepire la direttiva 2009/28/Ce, ha ampliato e rivisto la definizione di biomassa. Per biomassa si intende "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e 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 e urbani".

In Italia, secondo il rapporto statistico del Gestore servizi energetici (GSE, 2010), la produzione di energia rinnovabile è passata, dal 2000 al 2010, da 50990 gigawattora (GWh) a 76964 GWh con un trend di crescita crescente negli anni (figura 4).

Nel 2008 le fonti rinnovabili di energia in Italia hanno contribuito complessivamente al consumo interno lordo italiano per una percentuale di poco superiore al 9,6%. Complessivamente nel 2008 si è avuto un aumento della produzione da fonti rinnovabili del 18% (+2.860 mille tonnellate equivalenti di petrolio o ktep) circa rispetto a quella del 2007 (15.641 ktep). L'incremento percentualmente più significativo, pur restando su valori assoluti molto bassi, proviene da fonti non

tradizionali quali l'eolico, il fotovoltaico, i rifiuti e le biomasse (legna, biocombustibili, biogas) che passano, sul totale delle rinnovabili, da poco più del 14% del 2000 al 34% del 2008.

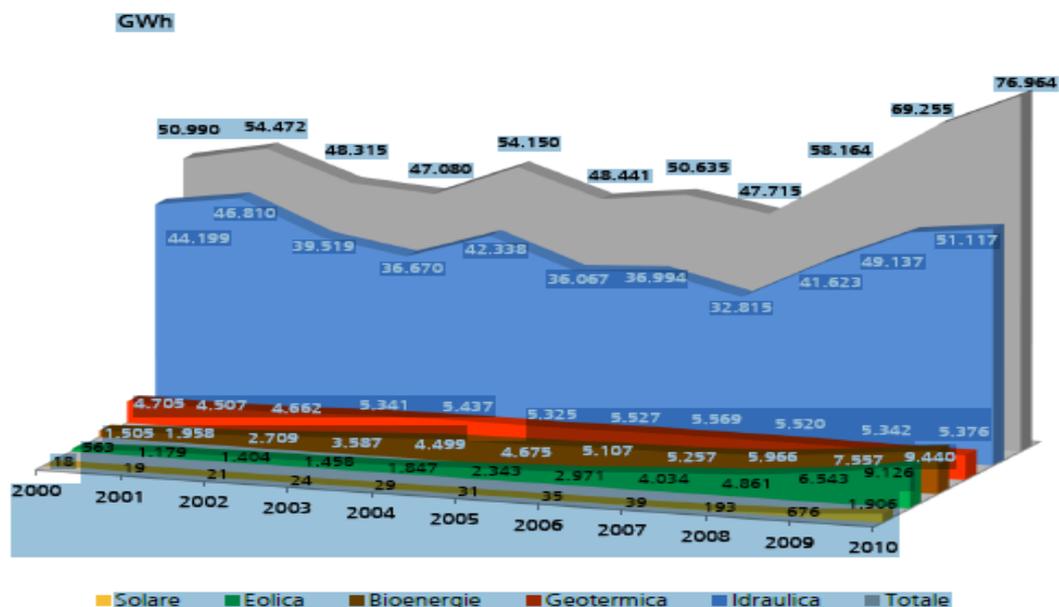


Fig. 4 La produzione rinnovabile in Italia dal 2000 al 2010

(da: rapporto statistico GSE, 2010)

Un esame del contributo energetico, in termini di ktep di energia primaria sostituita, fornito negli ultimi cinque anni da alcune tipologie di fonti rinnovabili evidenzia gli andamenti che seguono:

- l'idroelettrico, che fornisce la quota più rilevante, è caratterizzato da una forte fluttuazione da attribuire a fattori di idricità;
- la geotermia mostra un contributo relativamente costante, che nel periodo considerato oscilla intorno a 1,4 Mtep;
- per quanto riguarda le altre rinnovabili, si evidenzia nel 2008 il buon incremento della produzione eolica (+20%) e la sorprendente crescita dei biocombustibili (+227%). Meno marcati invece gli aumenti di biomassa legnosa (+5%) che si attesta su valori ancora lontani da quelli tipici dei Paesi europei, dei rifiuti (+3%) e dei biogas (+11%);
- molto bene inoltre le produzioni da fonti solari quali il solare termico (+44%) e il fotovoltaico, quasi quattro volte rispetto al 2007 (Enea, 2010-Ricerca e innovazione per un futuro low-carbon).

In Toscana gli indirizzi energetici sono dettati dal Piano di indirizzo energetico regionale (PIER) (Consiglio Regione Toscana, 2008). Il Piano ha validità fino al 2010 e tra i suoi principali obiettivi prevede l'attuazione delle raccomandazioni dell'Unione europea per raggiungere gli obiettivi, entro il 2020, di aumentare del 20% la quota di energia prodotta attraverso le fonti rinnovabili, di ridurre della stessa percentuale i consumi energetici e di conseguenza di diminuire della stessa misura anche le emissioni di gas che alterano il clima, come l'anidride carbonica. Per ogni fonte di energia rinnovabile è calcolata la potenza degli impianti installati prima dell'entrata in vigore del PIER e quella aggiuntiva prevista al 2020. (Ministero dell'Ambiente, 2011).

In Toscana la produzione di biomassa utilizzabile a fini energetici è stimata in circa 1.090.000 tonnellate/anno, comprensiva dei residui forestali, agro-forestali, agricoli e dell'industria del legno, con una possibile installazione fino a 135MW di potenza elettrica (Università degli Studi di Firenze, 2008). Ipotizzando di aggiungere alla produzione di cui sopra anche la biomassa ottenibile da piantagioni energetiche dedicate (short rotation forestry) nonché i prelievi legnosi correlati alla manutenzione e coltura dei boschi toscani (IFT, 2008), il materiale complessivamente utilizzabile a fini energetici può essere stimato pari a 2.500.000 tonnellate/anno (di cui 1,09 residui).

Tenendo presente la disponibilità di biomassa sul territorio regionale, stimata sulla base di una analisi territoriale su piattaforma GIS fondata sui dati relativi all'uso del suolo ed alle produttività agro-forestali, il contributo della stessa può essere quantificato sia in termini esclusivi di energia elettrica che termica. Volendo perseguire una politica di sostenibilità ambientale dell'uso della biomassa, si prevede lo sviluppo di "filiera corte" ed un dimensionamento ottimale degli impianti in 0,8 – 1,5 MWt estendibili a 3 MWt in caso di impianti di cogenerazione.

Quindi, tenuto conto delle tonnellate di biomassa annualmente disponibili, si prevede:

- l'impiego, entro il 2020, di circa mezzo milione di tonnellate di biomassa nella produzione di energia elettrica, per una potenza di circa 60 Mwe, cui si uniscono ulteriori 40 Mw di energia prodotta da biogas e rifiuti, per un totale di producibilità al 2020 di circa 1.100 GWh.
- l'impiego, entro il 2020, di circa 2 milioni di tonnellate di biomassa nella produzione di energia termica, per una potenza di circa 600 MW termici.

1.1.3.4 Le energie rinnovabili in prospettiva

Il rapporto speciale sulle fonti di energia rinnovabile (IPCC, 2011) presenta una valutazione sul contributo ambientale e sugli aspetti economici che le energie rinnovabili (RE) possono fornire per la mitigazione dei cambiamenti climatici e lo sviluppo sostenibile.

Dal rapporto emerge che le energie rinnovabili, potranno svolgere un ruolo significativo nella riduzione delle emissioni di gas serra e rappresentano un'opportunità unica in direzione dello sviluppo sostenibile; in effetti, circa l'80% dell'approvvigionamento energetico mondiale potrebbe essere, teoricamente, coperto da fonti rinnovabili entro la metà del secolo, sempre a condizione che i decisori politici sostengano questa scelta. Un miglioramento considerevole, visto che gli ultimi dati al 2008 si fermano al 12,9% del totale.

Nella relazione si evidenzia come la diffusione crescente delle energie rinnovabili potrebbe portare a un risparmio complessivo di gas serra equivalente a 220-560 miliardi di tonnellate di anidride carbonica ($GtCO_{2eq}$) tra il 2010 e 2050. Ciò significherebbe contenere l'aumento della temperatura globale entro i 2 gradi Celsius, un obiettivo riconosciuto negli accordi di Cancun dalla Convenzione sul Clima delle Nazioni Unite.

Il rapporto speciale sulle fonti di energia rinnovabile, approvato dai rappresentanti dei governi di 194 nazioni, ad Ab Habitus, ha esaminato la penetrazione attuale di sei tecnologie RE e il loro potenziale impiego nei prossimi decenni: bioenergia, da colture energetiche, forestali, residui agricoli, allevamento e biocarburanti di seconda generazione; energia solare diretta, fotovoltaica e solare; energia geotermica; energia idroelettrica da fiumi e dighe; energia degli oceani, dagli sbarramenti delle correnti oceaniche fino allo sfruttamento delle differenze di temperatura; energia eolica, compresi i sistemi on e off-shore.

Sono stati delineati più di 160 scenari sulla possibile penetrazione delle energie rinnovabili entro il 2050, considerando anche le implicazioni ambientali e sociali delle installazioni, per esplorare possibili mondi futuri.

I ricercatori hanno affrontato anche il problema dell'integrazione delle realizzazioni nei sistemi energetici esistenti e futuri e le ricadute economiche nei territori. Accelerare l'utilizzo delle energie rinnovabili presenterà nuove sfide tecnologiche e istituzionali, in particolare la loro integrazione nei sistemi energetici esistenti.

Secondo l'IPCC, tecnicamente, sarebbe possibile coprire il 100% della domanda attuale di energia del Pianeta con le fonti rinnovabili, ma le diverse tipologie di energia verde richiedono ancora processi di integrazione con i sistemi energetici esistenti. Per questo sembra realistico, anche se si tratta dello scenario più ottimistico presentato, fissare al 77% la percentuale raggiungibile nel 2050. Ciò significherebbe produrre green i tre quarti del fabbisogno energetico del mondo, pari a circa 314 di 407 exajoules all'anno. A titolo di confronto, 314 exajoules è oltre tre volte l'approvvigionamento energetico annuale negli Stati Uniti nel 2005, analogo al livello del continente europeo, in base alle stime di fonti indipendenti.

Ciascuno degli scenari è sostenuto da una serie di variabili, legate all'efficienza degli impianti, alla crescita della popolazione e al consumo pro capite, ma è sempre più evidente che, se anche la quota delle energie rinnovabili probabilmente aumenterà anche senza attivare politiche specifiche, l'esperienza passata ha dimostrato che gli incrementi maggiori possono derivare solo da scelte finalizzate.

Restano ancora da sviluppare nuove tecnologie più efficienti, anche se alcune sono già economicamente competitive, perché in alcuni casi i costi di produzione sono attualmente superiori ai prezzi di mercato dell'energia. Tuttavia, se gli impatti ambientali come le emissioni di inquinanti e gas serra venissero monetizzati e inclusi nel prezzo dell'energia, il loro costo complessivo sarebbe più competitivo.

Politiche pubbliche che riconoscano e riflettano sui benefici economici, sociali e ambientali delle energie rinnovabili, compreso l'effetto di ridurre l'inquinamento atmosferico e migliorare la salute pubblica, saranno la chiave per realizzare il migliore scenario prospettato nel Rapporto: tre quarti del fabbisogno energetico mondiale da energia rinnovabile con un costo complessivo pari all'1% del Pil mondiale.

L' intergovernmental Panel on Climate Change ha inoltre evidenziato come il settore agricolo, più degli altri, possa fornire un contributo attivo alla mitigazione dell'effetto serra, sia per la produzione di energia da fonti rinnovabili, sia per l'accumulo di sostanza organica nei suoli agricoli, nelle foreste e nelle coltivazioni agricole; il ruolo dell'agricoltura diviene quindi fondamentale nella soluzione delle problematiche ambientali ed energetiche di questo secolo.

1.2 - Le biomasse solide e la filiera legno-energia

1.2.1 Le biomasse solide

1.2.1.1 Premessa

Nel 2004 le biomasse hanno contribuito alla copertura del 10,4% dell'offerta mondiale di energia primaria (Enea, 2005). A livello europeo è la fonte di energia rinnovabile più utilizzata contribuendo per oltre il 68 % alla produzione di energie rinnovabile (EurObserv'ER, 2011) che rappresenta tuttavia appena il 7,5% della produzione totale di energia. I Paesi leader nella produzione di biomasse ad uso energetico sono: Francia e Svezia per le biomasse legnose, Regno Unito e Germania per il biogas, Germania per il biodiesel e Spagna per il bioetanolo. L'Italia, con il 2,7% circa del fabbisogno energetico coperto da biomasse (Enea, 2005b), si pone al di sotto della media europea. In Italia, infatti, la produzione di biomasse energetiche è rimasta sin ad ora patrimonio di un numero ristretto di operatori per lo più circoscritti alla filiera "legno-energia" legata quindi all'impiego di risorse forestali e residui provenienti dall'attività agricola e dalla lavorazione industriale del legno; solo di recente, sotto la spinta della politica d'incentivi a livello nazionale ed europeo, l'interesse si è aperto anche verso le altre materie prime di origine agricola e zootecnica. Una stima indicativa in merito alla disponibilità del territorio nazionale destinabile a colture energetiche dedicate, annuali o poliennali, è nell'ordine di oltre 1 milione di ha.

Allo stato attuale, un punto critico per la diffusione dell'utilizzo dei biocombustibili è rappresentato dal livello tecnologico: la maggior parte delle tecnologie a tutt'oggi esistenti per la conversione energetica delle biomasse necessitano di ulteriore sperimentazione, sia per aumentare i rendimenti e ridurre i costi di conversione, in genere sensibilmente superiori a quelli dell'energia prodotta con impiego di combustibili fossili, sia per adattare macchinari di origine estera alle diverse caratteristiche del materiale reperibile in Italia.

1.2.1.2 Definizione

Il termine biomassa riunisce una gran quantità di materiale di natura eterogenea a matrice organica, capace di rinnovarsi e di essere convertito in energia sostitutiva di derivati del petrolio costituendo la materia prima in appositi processi di

trasformazione e produzione sia di biocarburanti, per il settore dei trasporti, che di elettricità e calore. La biomassa può essere considerata un serbatoio di energia solare captata ed incamerata a breve ciclo attraverso i processi di fotosintesi clorofilliana ed il metabolismo degli organismi viventi.

Secondo la definizione riportata dalla direttiva UE 2001/77 e dal decreto legislativo n.387 del 29/12/2003, per biomassa si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (sia di origine vegetale che animale), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti urbani.

Tale fonte di energia è considerata neutrale ai fini dell'incremento di gas a effetto serra ed in grado di apportare indubbi vantaggi dal punto di vista ambientale: le emissioni di anidride carbonica di un impianto alimentato a biomassa sono molto inferiori rispetto a quelle di uno alimentato a gasolio; oltre a questo, bisogna tener conto di come queste quantità limitate di CO₂ emesse possano essere considerate pari a quelle assorbite dalla pianta originaria, durante il suo processo di crescita, attraverso la fissazione del carbonio nei tessuti (Hammond et al., 2008).

1.2.1.3 I processi

I **processi** attraverso i quali viene prodotta energia a partire da biomasse sono principalmente due:

- **conversione biochimica** : avviene attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri microrganismi che si sviluppano nella biomassa tenuta a particolari condizioni. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità superiore al 30% e rapporto C/N<30.
- **conversione termochimica** : avviene attraverso l'azione del calore e la conseguente combustione della biomassa. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità inferiore al 30% e rapporto C/N>30.

1.2.1.4 I biocombustibili

I **biocombustibili** possono essere suddivisi in tre principali categorie in base al loro stato fisico: solido, liquido o gassoso:

- **Biocombustibili solidi**: costituiti principalmente da prodotti a matrice legnosa destinati alla combustione diretta (legna da ardere di varie pezzature, cippato, ecc.)

o previa trasformazione in forme densificate (pellet e bricchetti). Sono utilizzati specialmente per la produzione di calore, nei settori residenziale ed industriale, ed elettricità.

- **Biocombustibili liquidi:** prodotti derivanti per lo più da colture dedicate attraverso processi di estrazione (olio vegetale puro) ed esterificazione (biodiesel) degli olii vegetali o di fermentazione e distillazione di materiali zuccherini (bioetanolo); sono di particolar interesse per la produzione di biocarburanti nel settore dei trasporti.
- **Biocombustibili gassosi:** prodotti derivanti da processi di fermentazione anaerobica di biomasse umide a componente organica quali reflui zootecnici, civili o agro-industriali: le colonie batteriche in mancanza di ossigeno producono gas costituito al 45-55% da metano.

Con il termine **biocarburante** si fa riferimento ai biocombustibili liquidi e gassosi, ovvero a quei biocombustibili, quali il biometano ed il biodiesel, atti ad essere utilizzati per l'alimentazione di motori a combustione interna (ciclo Diesel e ciclo a Otto): il loro impiego è tradizionalmente legato al settore dei trasporti in sostituzione dei combustibili fossili per autotrazione, anche se, nel corso degli ultimi anni, si è assistito ad una rapida evoluzione del loro campo di applicazione anche in direzione della generazione elettrica e termica ed in particolar modo della cogenerazione.

Nell'ambito dei biocarburanti quelli che ad oggi vengono, invece, destinati prevalentemente alla generazione elettrica e termica e alla cogenerazione, sono gli oli vegetali puri ed il biogas; essi trovano applicazioni ancora molto limitate nel settore dei trasporti ma potranno avere maggior peso nel breve termine, inizialmente soprattutto nell'alimentazione dei mezzi agricoli.

I biocombustibili solidi sono invece tradizionalmente legati al settore del riscaldamento e della generazione elettrica e diffusamente impiegati negli impianti di teleriscaldamento e cogenerazione alimentati da fonte rinnovabile.

1.2.1.5 Comparti di provenienza

I **comparti di provenienza** delle biomasse sono i seguenti:

- **forestale e agroforestale:** residui delle operazioni selvicolturali e delle attività agroforestali, prodotti dell'utilizzazione dei boschi.

- **agricolo:** residui colturali provenienti dall'attività agricola (potatura di vigneti, oliveti e frutteti, altri residui di natura composita provenienti da coltivazioni di cereali e seminativi come paglie di riso e di cereali autunno-vernini, stocchi, tutoli e brattee di mais) e prodotti di colture dedicate quali:

1. **piante** arboree o erbacee annuali e poliennali per la produzione di **biomassa ligno-cellulosica** (es. pioppo ecc.),
2. **piante oleaginose** per la produzione di olio vegetale e biodiesel (girasole ecc.),
3. **piante alcoligene** per la produzione di bioetanolo (es. canna da zucchero, tubercoli di barbabietola, granella di mais ecc.).

Con il termine “**colture dedicate**” o “colture energetiche” si fa riferimento dunque a colture allestite su terreni di normale coltivazione o su set-aside allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia.

- **zootecnico:** reflui zootecnici per la produzione di biogas;
- **industriale:** residui provenienti dalle industrie del legno (es. scarti di segherie ecc.) e della carta, nonché residui effluenti dell'industria agro-alimentare;
- **rifiuti urbani:** residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani.

1.2.1.6 Biocombustibili solidi: le biomasse ligno-cellulosiche

L'utilizzo di biomasse legnose negli impianti per la produzione di energia costituisce una soluzione innovativa che, oltre ad abbattere il consumo dei derivati del petrolio e limitare le emissioni inquinanti, di fatto rappresenta una possibilità per attuare un corretto impiego delle risorse boschive ed il recupero e la valorizzazione degli scarti provenienti dal settore agricolo, urbano ed industriale, nel rispetto dei principi di sostenibilità e tutela ambientale e del territorio.

La filiera ligno-cellulosica coinvolge sia il settore forestale, sia quello agricolo che industriale prendendo origine da materie prime di cui i nostri territori sono ricchi, quali: residui di potature di vigneti, oliveti, frutteti e del verde urbano, prodotti di colture boschive dedicate (es. pioppicoltura), residui e prodotti dell'attività selvicolturale provenienti sia dal taglio programmato dei boschi sia dalla loro pulizia periodica, residui delle industrie del legno e della carta.

Si tratta di tutti materiali legnosi (es. legname, segatura, ecc.) e/o derivati (paglia, sansa, pula, gusci, noccioli ecc.) contenenti cellulosa e con grado di umidità inferiore al 30%, atti quindi al processo di conversione termochimica.

Poiché la biomassa legnosa costituisce storicamente nel nostro Paese, coperto per il 32,3% da boschi, una delle principali fonti di energia rinnovabile, la sua produzione è sicuramente la più diffusa e consolidata sul territorio e impiegata in maniera diffusa in particolar modo per la produzione di calore. I combustibili solidi sono utilizzati generalmente per il riscaldamento degli ambienti civili o industriali e per la produzione di energia, principalmente termica ed elettrica in cogenerazione.

Le problematiche che possono insorgere connesse ai processi di combustione delle biomasse, sono imputabili, in parte all'inadeguatezza dell'impianto, ma più spesso alla qualità della biomassa: il biocombustibile non in grado di soddisfare i requisiti standard richiesti, legati principalmente al contenuto di umidità e ceneri, e ciò può con un basso potere calorifero compromettere l'efficienza del processo e danneggiare lo stesso impianto.

Dunque, per ovviare a tali inconvenienti e diffondere l'utilizzo delle biomasse solide su vasta scala, è indispensabile indirizzare la produzione verso forme di prodotto dalle caratteristiche il più possibile standardizzate.

Grazie al bilancio ambientale indubbiamente favorevole e ai buoni rendimenti energetici, il mercato delle biomasse legnose si prospetta in espansione, sia a livello industriale che per uso domestico. Nonostante questo, negli ultimi anni si è assistito ad un incremento dei costi di produzione che rischia di compromettere la redditività della filiera; oltre ai costi, tra gli elementi di maggior criticità vi sono le difficoltà logistiche legate alla viabilità per il recupero del materiale e alle operazioni di raccolta, trasporto ed immagazzinamento (AAVV, 2009).

1.2.1.7. Il valore energetico dei biocombustibili solidi

Il valore energetico della biomassa legnosa è definito sulla base di:

A) Parametri fisici:

- ✓ **Potere Calorifero 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. Considerata un umidità del 12-15% il PCI varia tra

3600-3800 kcal/kg. Il PCI è comunque 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:** è l'espressione percentuale del rapporto (peso fresco–peso secco)/peso fresco, indica cioè la percentuale d'acqua sul peso fresco; l'umidità relativa influisce sui meccanismi di combustione, sulle qualità chimiche del legno e sul peso specifico e varia tra il 25-60% sul tale quale in funzione della specie, della stagione di taglio, dell'età e della parte di pianta considerata.
- ✓ **Densità:** è la massa per unità di volume e si misura in kg/m^3 , rappresenta il più comune indicatore di qualità del materiale poiché il potere calorifero è direttamente proporzionale alla densità. Varia tra 800 e 1120 kg/m^3 se riferita al fresco e tra 360 e 810 kg/m^3 se riferita al secco.

B) Parametri chimici relativi alla composizione dei polimeri:

- ✓ contenuto in **lignina**: varia tra il 20-30% del peso secco e conferisce alto potere calorifero;
- ✓ contenuto in **cellulosa**: costituisce circa il 50% del peso secco e conferisce alto potere calorifero;
- ✓ contenuto in **emicellulosa**: varia tra il 10-30% del peso secco ed ha potere calorifero più modesto rispetto ai precedenti due polimeri.

C) Parametri chimici relativi alla composizione elementare:

- ✓ contenuto in carbonio (tra il 49-51%) e idrogeno (tra il 5-7%): alte percentuali conferiscono alto potere calorifero.
- ✓ contenuto in ossigeno (tra il 41-45%), azoto (tra il 0,05-0,4%) e ceneri (tra il 0,5-1,5%): alte percentuali conferiscono basso potere calorifero.

1.2.1.8 Principali biocombustibili solidi

Nel mercato del legno per fini energetici, sono presenti numerosi assortimenti, atti ai diversi tipi di apparecchi da combustione. La definizione e caratterizzazione dei diversi tipi di biomassa legnosa si ritrova nelle specifiche tecniche “UNI CEN/TS 14588 – Biocombustibili solidi: Terminologia, definizione e descrizioni” e “UNI CEN/TS 14961 – Biocombustibili solidi: specifiche e classificazione”; sulla base di

queste specifiche è stata pubblicata in Italia la specifica tecnica UNI/TS 11264 “Caratterizzazione di legna da ardere, brichette e cippato”.

Le norme definiscono le classi di qualità e le specifiche, cioè la descrizione delle proprietà, di tutti i biocombustibili solidi; inoltre, il Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri (DPCM, 2002) individua le biomasse combustibili e le relative condizioni di utilizzo ai fini dell’impiego in impianti di combustione civili ed industriali.

Infine, il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), anticipando il legislatore nella definizione di una specifica normativa di regolamentazione, ha fornito una serie di schede tecniche di caratterizzazione dei combustibili a fini energetici con valenza di raccomandazione, allo scopo di migliorare le condizioni di commercializzazione dei prodotti e i rapporti tra gli attori del sistema.

L’uso relativamente poco agevole, specie per ciò che concerne operazioni di trasporto e caricamento, ed il bisogno di grandi spazi per l’immagazzinamento ostacolano, in molti casi, la più ampia diffusione del legno come fonte energetica: per questo stanno prendendo sempre più piede formati legnosi frutto di ulteriori operazioni, quali quelle di sminuzzamento, essiccazione e pressatura. La norma UNI CEN/TS definisce come “legno da ardere” il legno tagliato o spaccato, pronto per il focolare e utilizzato negli apparecchi domestici che bruciano legno come: stufe, termocaminetti e sistemi di riscaldamento centralizzato. Dall’ulteriore taglio del materiale si ottengono “legno frantumato” e “cippato”, mentre attraverso successivi processi di compressione e più spinta essiccazione si originano le forme densificate quali “pellet” e “bricchetti”. Quest’ultimi due formati sono considerati combustibili legnosi migliorati e si definiscono come “biocombustibili addensati”; essi sono in grado di ovviare alle problematiche sopra citate, legate alle operazioni di trasporto ed immagazzinamento, poiché presentano, a parità di potenziale calorico, minor volume.

Le principali tipologie di biomasse solide presenti sul mercato sono:

- ✓ **Tronchi interi** – legno fresco, richiede molto lavoro per essere ridotto alla pezzatura definitiva.
- ✓ **Legna spaccata corta (tondelli, ciocchi)** – legno di varia umidità, fresco o pre-essiccato in bosco, ridotto alla pezzatura idonea all’utilizzo attraverso lavorazione meccanica con utensili affilati o necessitante di ulteriore lavorazione. Le dimensioni tipiche vanno dai 50 ai 500 mm di lunghezza per ciocchi e tondelli e

superiori ai 500 mm per il tondo lungo; i tenori di umidità sono invece solitamente inferiori al 50% e assumono valori differenti a seconda del tempo di stagionatura. Le classi dimensionali vengono distinte in base al diametro (D) e alla lunghezza (L). L'utilizzo di questa tipologia di biocombustibile, utilizzata quasi esclusivamente a livello domestico in piccoli impianti alimentati manualmente, è ormai in declino a favore delle forme densificate. Le caldaie a legna infatti, oltre a non offrire la possibilità di automazione nel caricamento, hanno in genere minor efficienza energetica comparate alle caldaie a cippato o pellet.

- ✓ **Legno frantumato** – legno di varia umidità, fresco o pre-essiccato in bosco, ridotto in scaglie di pezzatura variabile ed eterogenea, generalmente più grossolana rispetto al cippato, attraverso lavorazione meccanica con utensili affilati. Il legno frantumato si classifica in frazione principale, fine e grossolana sulla base del passaggio del materiale attraverso un vaglio a fori circolari.
- ✓ **Cippato**: biomassa ligno-cellulosica derivante da piante intere o tronchi sramati, da scarti dell'attività selvicolturale di gestione e manutenzione dei boschi, da scarti dell'agricoltura (residui di potature, ramaglie, cimali, residui di colture erbacee ecc), dagli scarti più grossolani dell'industria del legno e della carta, con e senza corteccia, costituiti però esclusivamente da legno vergine cioè non contaminato da materiali sintetici quali colle, vernici, plastiche, preservanti, ecc. La specie legnosa migliore per produrre il cippato è il faggio. Il materiale legnoso viene sottoposto a sminuzzamento e frammentazione attraverso trattamento meccanico con utensili affilati (macchine cippatrici) e a successiva essiccazione artificiale o all'aria con stoccaggio in cumulo per un tempo idoneo. Il cippato è dunque costituito da scaglie di pezzatura variabile ma grosso modo omogenea, la dimensione tipica è compresa tra 5-100mm e la composizione dimensionale, valutata sulla base del passaggio del materiale attraverso vagli a fori circolari o quadrati, è la seguente:

1. frazione principale (> 80% della massa): dimensioni 3,15-100 mm
2. frazione fine (< 5% della massa): dimensioni < 1mm
3. frazione grossolana (< 1% della massa): dimensioni > 45 mm

Scendendo più nel particolare le principali caratteristiche qualitative del cippato sono riportate di seguito (figura 5).

La frammentazione omogenea del materiale consente, rispetto ai precedenti formati, un più agevole utilizzo, permettendo: lo stoccaggio in silos ed il

caricamento automatico nelle caldaie per il riscaldamento di edifici e l'impiego diffuso nel teleriscaldamento.

L'omogeneità, ottenuta dalla calibratura tramite vagli, è il parametro più importante per il buon successo nell'impiego energetico: dimensioni troppo disomogenee nel materiale, infatti, possono provocare frequenti bloccaggi nei sistemi di alimentazione degli impianti.

Il cippato, rispetto al pellet, richiede spazi più ampi per l'immagazzinamento, per l'istallazione della caldaia e del silo, poiché occupa maggior volume a parità di contenuto energetico per via delle rese in calore minori legate al maggior tasso di umidità: gli impianti a cippato sono dunque, al contrario di quelli a pellet, poco applicabili al contesto urbano e in prossimità di edifici già esistenti.

Origine e provenienza		Biomassa legnosa non contaminata (1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.1.4, 1.1.6, 1.2.1.1, 1.2.1.2, 1.2.1.4)		
Tipologia commerciale				
NORMATIVA	Dimensioni o Pezzatura			
		Frazione principale >80% (massa)	Frazione fine <5% Frazione grossa <1%	
	P 16	3,15 mm ≤ P ≤ 16 mm	< 1 mm > 45 mm, tutto < 85 mm	
	P 45	3,15 mm ≤ P ≤ 45 mm	< 1 mm > 63 mm	
	P 63	3,15 mm ≤ P ≤ 63 mm	< 1 mm > 100 mm	
	P 100	3,15 mm ≤ P ≤ 100 mm	< 1 mm > 200 mm	
	Contenuto idrico (M)			
	M20	≤ 20% essiccato		
	M30	≤ 30% stagionato all'aria e adatto ad essere stoccato nel silo		
	M40	≤ 40% non stagionato e non adatto ad essere stoccato nel silo		
M55	≤ 55%			
M65	≤ 65%			
Contenuto di cenere (%ss)				
A0.7	≤ 0,7%			
A1.5	≤ 1,5%			
A3.0	≤ 3,0%			
A6.0	≤ 6,0%			
A10	≤ 10,0%			

Fig. 5- Principali caratteristiche qualitative del cippato

(da: "Legna e cippato" Regione Toscana – AIEL , 2009)

L'umidità del cippato è solitamente compresa tra 25 e 50%, limite quest'ultimo oltre il quale le tecnologie disponibili per la combustione presentano problemi di funzionamento: ad esempio l'umidità non deve superare per la caldaia a griglia

fissa il 30% e generalmente il prodotto viene commercializzato con un'umidità inferiore al 35%.

Il PCI non varia in maniera significativa in funzione della specie legnosa, ma è piuttosto determinato in maniera importante dal valore dell'umidità percentuale del materiale, parametro legato prevalentemente al settore di origine.

L'attuale mercato del cippato in Italia è caratterizzato da notevoli elementi di complessità e disomogeneità territoriale che ne limitano la diffusione quali:

1. costi di produzione molto disomogenei;
 2. notevole diversificazione della categorie di utilizzatori finali con diverse propensioni di spesa;
 3. mancanza di caratterizzazione merceologica e di forme contrattuali standardizzate che stabiliscano il prezzo sulla base del potenziale calorico, e quindi del contenuto idrico, premiando il valore qualitativo;
 4. mancata applicazione di chiari sistemi di classificazione delle biomasse legnose che non favorisce il confronto delle quotazioni, non offre garanzie agli operatori economici, crea costi alti di transazione.
 5. presenza di forti condizioni di competizione con altri impieghi (pannelli truciolati, carta);
- ✓ **Pellet:** normalmente è prodotto a partire da scarti di lavorazione delle segherie e delle industrie del legno (segatura, trucioli, legname macinato, refili e sciaveri, corteccia e legname tritato ecc.) ma anche a partire da legno frantumato, cippato e dai residui dell'attività agricola e forestale. Il pellet inoltre può includere al suo interno anche biomassa erbacea e parti di semi e frutti. La componente legnosa deve essere, al pari del cippato, rigorosamente legno vergine cioè non trattato quindi esente da materiali sintetici; sono esclusi dunque gli scarti dei mobilifici, i pannelli truciolati, i compensati e tutti quei residui legnosi derivanti dalla demolizione di manufatti lignei trattati.

Il processo di produzione include l'asciugatura e compressione a caldo del materiale polverizzato: grazie alla capacità legante della lignina non è indispensabile il ricorso all'aggiunta di additivi.

Il prodotto finale consiste di piccoli cilindri con diametro da 6 a 8 mm (D) e lunghezza (L) di 10-30 mm in rapporto $L \leq 5x D$ ed è caratterizzato rispetto alle precedenti tipologie di biomasse solide da bassi valori di umidità relativa

tipicamente minori del 12% e mai superiore al 20%: oltre il 20% d'umidità infatti il materiale si deteriora sfaldandosi in piccoli frammenti. Si devono usare quindi accorgimenti particolari nella fase di conservazione: poiché il basso tenore di umidità conferisce al prodotto caratteristiche igroscopiche, l'ambiente di immagazzinamento deve essere sufficientemente asciutto affinché il materiale resti integro e non assorba umidità.

Il potere calorifico del pellet è di 4,5-4,9 kWh/kg : 2,1 t di pellet equivalgono a circa 1 m³ di diesel leggero, anche se, rispetto al combustibile diesel, a parità di valore energetico, richiede spazi di immagazzinamento circa tre volte superiori. I vantaggi che presenta invece rispetto al cippato e alla legna da ardere sono connessi al minor contenuto d'acqua, all'elevata densità apparente, al maggior contenuto energetico e alla pezzatura più uniforme e costante.

Per tali caratteristiche il pellet è un formato di biomassa solida che consente l'immagazzinamento senza difficoltà ed il dosaggio e convoglio automatizzati nella camera di combustione sia di stufe, per il riscaldamento di singoli locali, che di caldaie, per il riscaldamento centralizzato: grazie al suo alto potere calorifero ed al comportamento simile ad un fluido, che consente il pompaggio attraverso un aspiratore o il convoglio attraverso semplici congegni meccanici (es. coclee) dal serbatoio alla camera di combustione, il pellet è un combustibile in grado di competere con la comodità dei tradizionali impianti di riscaldamento a gas o a gasolio.

Il mercato del pellet è decisamente in espansione ed il suo impiego è rivolto in particolar modo ad impianti di piccola potenza, per piccoli e medi impianti residenziali, e al teleriscaldamento al posto del cippato.

- ✓ **Bricchetti (o tronchetti):** prendono origine dal medesimo materiale utilizzato per la produzione di pellet attraverso lo stesso processo di essiccazione e compressione a caldo di materiale finemente triturato; rispetto al pellet si utilizzano solitamente residui e polveri più grossolane.

I bricchetti hanno generalmente sezione circolare o quadrata e dimensioni comprese tra 25-125 mm per il diametro e 50-400 mm per la lunghezza; tal volta è presente un foro centrale al fine di favorire la combustione. La densità di un bricchetto è di circa 1,2 kg/dm³. L'umidità relativa è superiore a quella del pellet

ma comunque non oltre il 15% e generalmente si attesta su valori attorno al 6-8%, condizioni che permettono buone rese e impediscono la fessurazione del prodotto. I vantaggi del bricchetto consistono nella sua compattezza, maneggevolezza ed uniformità; il suo impiego è assimilabile a quello della legna in ciocchi, però, rispetto a questa, presenta, similmente al pellet, a parità di volume un maggior potere calorifero. I bricchetti vengono impiegati sia in impianti medio-grandi che in quelli residenziali o di piccola potenza anche se, per via del contenuto di umidità solitamente superiore e delle loro dimensioni, hanno rese minori rispetto al pellet ed il loro utilizzo negli impianti è in netta diminuzione. I bricchetti restano però una delle soluzioni più valide per chi ha una stufa a legna tradizionale o non vuole investire per acquistarne una a pellet, chiaramente più costosa.

1.2.2 La filiera legno-cippato-energia

Una filiera legno-energia può essere organizzata in ogni comprensorio territoriale ove sia disponibile biomassa legnosa proveniente dal bosco, da impianti di arboricoltura da legno o dalle industrie del settore di prima lavorazione del legno.

Qualora si voglia creare una filiera bosco-energia, a valenza territoriale, vi devono essere connessioni dirette fra la gestione forestale e l'approvvigionamento degli impianti termici. Occorre bilanciare l'esigenza del consumo medio annuo di cippato del comprensorio territoriale considerato e la disponibilità di combustibile, che dipende dalle dimensioni del bacino forestale di approvvigionamento, dalla sua composizione, dalla forma di governo, dalla fertilità stagionale, dalla viabilità forestale del comprensorio e dall'intensità dei prelievi previsti nell'ottica di una gestione e di uno sfruttamento razionale del bosco.

L'utilizzo delle risorse forestali, insieme alle attività di imboschimento o rimboschimento e alla realizzazione di infrastrutture (sentieri, piste, strade e piazzali di lavorazione), rappresentano l'insieme delle azioni svolte dall'uomo nei soprassuoli boscati al fine di garantirne la conservazione, la produzione di legname e di prodotti del sottobosco e la protezione idrogeologica.

La filiera legno energia può essere suddivisa in tre fasi principali:

- 1) utilizzazioni forestali
- 2) produzione cippato
- 3) produzione energia

1.2.2.1 Utilizzazioni forestali

L'abbattimento delle piante, la sramatura dei fusti e depezzatura dei tronchi, il concentramento, l'esbosco e l'accatastamento degli assortimenti legnosi ricavati vengono chiamati nel loro complesso utilizzazioni forestali; tali lavori possono essere eseguiti sia nell'ambito di interventi volti alla conservazione e al miglioramento colturale dei soprassuoli forestali sia in quello di operazioni più strettamente mirate alla raccolta del prodotto legnoso a fine ciclo di coltivazione, nell'ambito di una gestione forestale corretta.

Le utilizzazioni forestali possono essere realizzate con tre diversi sistemi di lavoro:

- ✓ Il sistema *del legno corto (Short Wood System)* che prevede l'abbattimento e l'allestimento della pianta sul letto di caduta e l'esbosco del materiale sezionato. Classico esempio la produzione di legna da ardere o la produzione di materiale da cartiera nel taglio del pioppeto.
- ✓ Il sistema *del fusto intero (Tree Length System)* che prevede l'esbosco di fusti interi sramati e la successiva riduzione in assortimenti all'imposto.
- ✓ Il sistema *dell'albero intero (Full Tree System)* che prevede l'abbattimento e il successivo esbosco della pianta comprensiva di rami. La sramatura e la depezzatura (se previste) vengono effettuate all'imposto. Questo sistema è utilizzato quando si prevede l'utilizzo della ramaglia (legna da ardere derivante da grossi rami di pioppo), quando il taglio deve essere sgombrato immediatamente dalla ramaglia (taglio di piantagioni e loro ricostituzione) o quando si utilizza la pianta intera per produzione di cippato

La scelta di un sistema di lavoro o di un altro è strettamente correlata alla pendenza del terreno, alla sua accidentalità (presenza di rocce affioranti, torrenti e quanto ostacoli il passaggio di mezzi), all'intensità di taglio (inferiori a 30 m³/ha, tra 30 e 80 m³/ha, superiori a 80 m³/ha), alle dimensioni unitarie delle piante utilizzate, all'accessibilità al bosco, alla presenza di vie di esbosco, alla preparazione del personale e alle attrezzature disponibili (riferite prevalentemente all'esbosco), alla convenienza economica ed energetica (Picchio et al., 2009)

1.2.2.1.1 Taglio

Il taglio è caratterizzato da due fasi consecutive e distinte :

- ✓ l'abbattimento che consiste nella recisione al piede degli alberi e nel loro atterramento, ed è un'operazione che viene condotta di solito tramite l'uso di motosega e attrezzi atti a governare la direzione di caduta delle piante, come cunei, leve di abbattimento e paranchi;
- ✓ l'allestimento che consiste in sramatura dei fusti e depezzatura primaria, eseguite con la motosega e con utensili manuali come roncole e accette, ed in un'eventuale scortecciatura del legname; queste operazioni possono essere eseguite sul letto di caduta oppure all'imposto dopo la fase di esbosco.

1.2.2.1.2 Esbosco

Per esbosco si intende l'operazione di trasporto dei tronchi di albero abbattuti fino al luogo in cui possono venire caricati su veicoli; il legname depezzato, o ancora sotto forma di fusti lunghi, viene movimentato dal letto di prima caduta all'imposto (un piazzale di raccolta del legno raggiungibile da una strada camionabile) su ruota impiegando trattori, o per avvallamento, cioè facendolo scivolare per effetto del suo peso verso valle lungo viali tagliafuoco o apposite piste o trasportandolo mediante sistemi a fune (teleferica).

L'esbosco con i trattori è il sistema più diffuso a livello nazionale. I trattori impiegati per questa operazione possono essere di tipo agricolo o specifici per l'uso forestale: nel primo caso si utilizzano trattori a quattro ruote motrici, cingolati o mini-articolati, cui possono essere applicati bracci caricatori per la movimentazione del legname o verricelli per lo strascico dei tronchi. I trattori articolati si suddividono in skidder, macchine specializzate per l'esbosco a strascico, e in forwarder dotati di sei o otto ruote e un cassone per il carico del legname, in grado di superare forti accidentalità del terreno e di lavorare con ottime produttività su terreni fino al 45% di pendenza.

I trattori possono esboscare il legname in differenti modi:

- a) a traino, è praticabile solo su terreni o piste con pendenze inferiori al 20%, impiega trattori a rimorchio a 1 o 2 assi (con pendenze superiori occorrono le ruote motrici).
- b) a soma, il legname viene caricato, anziché a mano, con la gru idraulica montata su trattori articolati portanti con capacità di carico fino a 15 m³ di legno tondo; questo sistema si applica nei cantieri a meccanizzazione avanzata e dove operano ditte boschive specializzate. Oppure, a livello di azienda agricola o piccola ditta boschiva, si utilizzano trattori 4 ruote motrici dotati di particolari attrezzature, dette gabbie, con capacità di carico fino a 5m³ (circa 25 q di legna da ardere); in entrambi i casi il

sistema risulta più maneggevole e sicuro nei percorsi fuoripista rispetto al trattore e rimorchio: a rittochino in discesa possono essere affrontate pendenze fino al 45% con i forwarder e fino al 30% nel caso dei trattori con gabbie.

c) a strascico, il legname è trascinato mediante verricelli a fune attaccati al trattore; è un sistema svolto sia sui terreni pianeggianti (caso infrequente in Italia, ma assai diffuso nelle foreste del Centro e Nord Europa), sia soprattutto sui terreni acclivi fino al 40-50% di pendenza; il lavoro nelle condizioni più difficili è svolto con trattori cingolati o articolati.

L'esbosco a teleferica si usa nei terreni con pendenza superiori al 50%. Con questo tipo di esbosco si ricorre a gru a cavo, sistemi di trasporto a fune impiegati in zone di montagna caratterizzate da scarsa viabilità, ma anche per la costruzione di elettrodotti, condutture dell'acqua e impianti di risalita.

L'esbosco basato sulla tecnica dell'avvallamento consiste nel far scivolare i tronchi lungo le pendici della montagna attraverso apposite piste o viali tagliafuoco.

Teoricamente, nell'ambito di una filiera bosco-legno-energia sarebbe opportuno prevedere l'esbosco delle piante intere "Full Tree System" e la sminuzzatura in bosco, evitando così tempi e costi di allestimento e carico degli assortimenti di minori dimensioni; tuttavia, la convenienza economica ad adottare un sistema od un altro, a parità di condizioni, è strettamente legata al prezzo di mercato del prodotto finale (Spinelli e Magagnotti, 2010).

Per l'esbosco a pianta intera sono utilizzabili gru a cavo per pendenze superiori al 50%, su pendenze inferiori i trattori con verricello, che possono muoversi sia sul terreno del bosco sia su percorsi secondari di esbosco realizzati con modesti movimenti di terra, mentre non è possibile adottare l'avvallamento perché la chioma esercita un attrito troppo forte sul terreno per permettere lo scivolamento della pianta su distanze significative.

1.2.2.1.3 Accatastamento

Per favorire la cippatura e per incrementare la qualità del cippato, là dove i tempi di approvvigionamento dell'impianto e dove gli spazi lo consentano, sarebbe opportuno abbattere il legname e stoccare preventivamente il legname all'aperto, lasciando trascorrere un periodo di 4-6 settimane tra abbattimento e raccolta, sfruttando l'energia solare per attivare il processo di essiccazione.

Le modalità di stoccaggio intermedio sono:

1. stoccaggio intermedio sul letto di caduta di piante intere: è la soluzione più semplice ed economica soprattutto se le piante sono troppo ingombranti per il trasporto su strada e troppo voluminose per una movimentazione efficace su distanze superiori al chilometro. Questo tipo di stoccaggio richiede grande cautela e una regolare attività di sorveglianza da parte degli operatori forestali, soprattutto se la stagione è a rischio d'incendio;

2. stoccaggio intermedio di modeste piante intere o depezzate: si trasportano più facilmente; lo svantaggio sta in termini di costo: si perdono i benefici in termini di tempo, spazio e costo della cippatura totale, che consente semplicemente di trasformare direttamente le piante intere, mentre qui dal legno si producono prima gli assortimenti tradizionali che verranno poi sminuzzati in un secondo momento. Se proprio non esistono alternative migliori, si può almeno cercare di razionalizzare l'intero procedimento, per esempio ricavando solo uno o due tronchetti dalla parte basale del fusto e cippando tutto il resto. I tronchetti saranno avviati allo stoccaggio all'aperto, mentre il cippato fresco verrà inviato immediatamente a un'apposita zona di stoccaggio chiusa o almeno coperta da un foglio di pvc per proteggere il cippato dalla degradazione ad opera di batteri e funghi. La stagionatura preventiva del legname da cippare richiede la messa in opera di un sistema di commercializzazione diverso da quello in uso per gli assortimenti tradizionali, che generalmente è basato sul peso fresco, perché la biomassa legnosa deve essere portata a combustione "secca" quindi bisognerebbe pagare il peso secco determinando l'umidità di ogni carico consegnato, interesse che si scontra con quello della ditta boschiva che invece si trova a lavorare e trasportare. Pagare il legname su base secca alla ditta boschiva può essere una proposta accettabile solo in presenza di alti volumi commercializzati, quindi per impianti di una certa taglia. Un'alternativa molto più semplice consiste nel pagare il volume, che è indipendente dall'umidità. La cippatura di materiale troppo secco genera molta polvere, che deve essere evitata soprattutto in prossimità dei centri abitati; la polvere poi risulta dannosa anche alle macchine perché intasa rapidamente i filtri dell'aria, che devono essere puliti con maggior frequenza, e può depositarsi sulle parti più calde della macchina favorendo il rischio di incendio: è indispensabile dunque controllare e pulire regolarmente la macchina. Se non è possibile essiccare il legname prima della cippatura, si può sempre essiccare il cippato ottenuto da legname verde, meglio se presso l'impianto a biomassa.

1.2.2.2 La produzione di cippato

Il termine cippatura, spesso usato al posto di quello di sminuzzatura ritenuto più corretto, è la versione italiana del vocabolo inglese chipping, che significa “ridurre in scaglie” attraverso un’azione meccanica di taglio, e identifica dunque un’operazione specifica, che consiste nel trasformare biomassa legnosa di varia natura in frammenti relativamente uniformi (dette particelle o cippato o definite dalla normativa cips) a forma di parallelepipedo, con una lunghezza compresa tra 2 e 5 cm, una larghezza massima di 2 cm e uno spessore di qualche millimetro. L’operazione è effettuata con macchine chiamate cippatrici, che impiegano diversi principi di funzionamento e sono prodotte in una gran varietà di modelli. Il principale vantaggio della sminuzzatura consiste nella sua capacità di fluidificare il legno, riducendone e omogeneizzandone una pezzatura altrimenti grossolana e disuniforme, così da agevolare il trasporto, la movimentazione interna all’impianto e da ottimizzare l’essiccazione e la combustione perché i chips offrono una maggiore superficie di contatto con l’aria rispetto alla comune legna da ardere. Il legname può essere trasformato anche in tondelli o spacconi, assortimenti derivanti dall’azione di spacco, però il cippato si ottiene mediante un processo più veloce, semplice e soprattutto meno laborioso, presenta un costo di lavorazione al quintale inferiore ed è prodotto anche utilizzando assortimenti poco pregiati o addirittura residui forestali, che altrimenti non troverebbero altro impiego risultando uno scomodo scarto da smaltire. Il cippato dunque ottimizza l’impiego della biomassa disponibile, dato che si può cippare anche quel materiale che non potrebbe essere trasformato in alcun assortimento convenzionale perché piccolo o difettoso o troppo umido e consente di ridurre il volume apparente degli scarti forestali (1– 20% di biomassa), facilitandone la movimentazione e il trasporto: una tonnellata di cippato fresco occupa circa tre metri cubi, mentre ce ne vogliono dieci per contenere la stessa quantità di ramaglia; il cippato infine risulta essere l’unico assortimento veramente idoneo all’alimentazione automatica degli impianti di riscaldamento per uso civile.

Tra gli svantaggi: l’ingente richiesta di potenza delle cippatrici, che ovviamente si ripercuote sul costo della macchina, sul consumo di combustibile e sugli impatti ambientali del processo; la scarsa conservabilità del legname cippato, in quanto i frammenti di piante intere si deteriorano rapidamente, soprattutto quando la loro umidità è superiore al 35–40%, perché iniziano a fermentare, perdendo in breve tempo

una discreta quantità di sostanza secca; il volume occupato dal cippato è sempre superiore, quasi doppio, all'ingombro di un peso equivalente di legname tondo: conviene sminuzzare ramaglia, scarti e piante di piccole dimensioni, mentre è meglio allestire in tondelli le piante medio-grosse, soprattutto se la distanza di trasporto è elevata.

Quando il cippato trova impiego per produrre pannelli a base di legno (di particelle o di fibre), carta e derivati oppure per estrarre il tannino, la sminuzzatura viene solitamente eseguita presso l'industria di prima lavorazione; nel caso invece dell'impiego energetico, la cippatura può essere eseguita direttamente nel bosco, presentando alcuni vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali di allestimento del legname:

- ✓ permette di utilizzare tutta la biomassa legnosa disponibile, compresa la ramaglia umida che altrimenti rappresenterebbe uno scarto e, rilasciata sul terreno, costituirebbe una facile esca per il fuoco;
- ✓ consente di eliminare parzialmente o del tutto la fase di allestimento e carico degli assortimenti di piccole dimensioni, con un risparmio di manodopera e un miglioramento nell'ergonomia del lavoro.

La sminuzzatura in bosco appare perciò particolarmente utile nei cantieri in cui l'allestimento manuale delle chiome richiede molto lavoro e ha un alto costo per unità di prodotto rispetto al basso valore degli assortimenti ottenuti. L'impiego della macchina cippatrice consente di abbattere tali costi e rende conveniente il recupero di una maggior quantità di biomassa, a condizione naturalmente che il cippato abbia uno sbocco di mercato.

La cippatura può inserirsi prima o dopo l'esbosco nel ciclo di lavorazione:

- ✓ può essere eseguita sul letto di caduta, ma solo su terreni pianeggianti con pendenza massima del 20% e poco accidentati;
- ✓ lungo una pista forestale, a condizione che questa sia sufficientemente larga per consentire il movimento di macchina operatrice e dei mezzi ausiliari;
- ✓ quando le condizioni di lavoro non sono favorevoli, a causa dell'eccessiva pendenza o accidentalità del terreno, occorre esboscare tutta la pianta compresa la chioma secondo il metodo "a pianta intera-Full Tree System" utilizzando i trattori con verricello per limitate pendenze, o gru a cavo per pendenze superiori al 50%, mentre non è possibile adottare la tecnica

dell'avvallamento, giunta all'imposto verrà eventualmente separata la porzione di legname da lavorare e poi cippato il tondame. Se all'imposto sono presenti assortimenti di legna più pregiati, con cui è possibile spuntare prezzi più alti in formato di legna a pezzi da ardere che in forma di cippato, si può prendere in considerazione l'idea di eseguire una selezione e separazione della biomassa legnosa.

Le **cippatrici** usate in selvicoltura sono sempre di tipo mobile, cioè montate su un telaio che può essere portato da un camion o da un trattore o trainato da un motore autonomo, specie quando la potenza richiesta è molto elevata. I modelli più grossi possono essere montati sul pianale di un camion e hanno sempre un motore autonomo, quello del camion invece è impiegato per azionare la gru incorporata che serve all'alimentazione. In ogni caso, il telaio sostiene un organo di taglio rotante (a disco, a tamburo e a vite senza fine), montato su cuscinetti a sfere, che riceve potenza attraverso una trasmissione a cinghie; la macchina è completata dagli apparati di alimentazione ed evacuazione.

Nelle cippatrici a disco l'organo di taglio è costituito da un pesante volano in acciaio su cui sono montati 2-4 coltelli, tutti in posizione radiale, una battuta regolabile funge da incudine e sostiene l'azione dei coltelli: la sporgenza dell'incudine può essere regolata manualmente per variare le dimensioni delle scaglie da produrre; in corrispondenza di ciascun coltello, il disco presenta piccole fessure attraverso cui passa il materiale tagliato; il disco ha un diametro minimo di 80 cm e ruota intorno a un asse orizzontale o inclinato di 40-45 gradi. Il legname da sminuzzare è sempre presentato ai coltelli in modo obliquo e viene tagliato a becco di flauto.

Nelle cippatrici a tamburo l'organo di taglio è costituito da un massiccio cilindro d'acciaio di diametro a partire dai 30 cm (cresce rapidamente nei modelli pesanti), che ruota intorno al proprio asse longitudinale, giacente su un piano orizzontale; i 2-4 coltelli sono montati sulla superficie esterna del cilindro, in posizione tangenziale. Anche in questo caso la sporgenza dell'incudine può essere regolata per variare le dimensioni delle scaglie. In genere è possibile montare un vaglio sotto il tamburo per aumentare l'omogeneità del cippato.

Nelle cippatrici a vite senza fine, l'organo di taglio è costituito da una spirale tagliente che ruota su un asse orizzontale: si tratta di un unico pezzo che non consente regolazioni della dimensione delle scaglie, che in genere è piuttosto elevata (50-80

mm di lunghezza); per questo motivo non è un sistema utilizzato comunemente. All'estero il materiale legnoso che ne deriva viene distinto dal cippato vero e proprio e viene chiamato chunk o spezzone.

Il cippato prodotto da una cippatrice a disco generalmente ha una pezzatura più grossa rispetto a quello prodotto da una cippatrice a tamburo.

La potenza richiesta dalle cippatrici varia con il diametro del materiale da sminuzzare, con la specie legnosa e l'umidità. In base alla potenza impiegata, le cippatrici sono distinte in tre categorie:

1. piccole cippatrici : impiegano fino a 50 kW e lavorano diametri fino a 20 cm;
2. medie cippatrici : da 50 a 100 kW di potenza e possono trattare diametri fino a 30 cm;
3. cippatrici pesanti: superano i 130 kW, lavorano diametri maggiori di 30 cm.

1.2.2.3 La produzione di energia

L'energia contenuta nelle biomasse può essere liberata attraverso vari processi: combustione, gassificazione, pirolisi e carbonizzazione.

La **combustione** è il processo di utilizzazione energetica della biomassa più antico e consolidato. In relazione al tipo di biomassa utilizzata, al contenuto di umidità presente e della quantità di ceneri prodotta il potere calorifico inferiore (è stata sottratta l'energia termica necessaria all'evaporazione dell'acqua) derivante dalla combustione varia.

Gli impianti che sfruttano la combustione di biomassa a scopi energetici possono essere suddivisi in due categorie :

- 1) **Impianti per la produzione di energia termica**, eventualmente in cogenerazione, a partire da combustibile solido con una potenza di solito inferiore a 5 – 6 mega watt (MW) termici (sono gli impianti con le migliori prestazioni sia economiche che tecniche e in termini di potenziale risparmio energetico);
- 2) **Impianti per la produzione di energia elettrica**, eventualmente in cogenerazione, a partire da combustibile solido o liquido con una potenza tra 2 e 15 MW elettrici.

Esistono diverse tipologie di impianti alimentati a cippato:

- 1) Impianti di combustione a griglia fissa e mobile.

E' la tipologia tradizionale più diffusa, si adattano bene a tutti i tipi di combustibile e flessibili nei confronti dell'umidità.

Le caldaie a griglia fissa richiedono materiale molto omogeneo sia per la ridotta dimensione della griglia sia perché pezzi fuori misura possono essere causa di blocchi alle coclee di trasporto e di caricamento. Il contenuto idrico di tali caldaie non deve superare il 30%, esse hanno infatti una scarsa inerzia termica in quanto i volumi della camera di combustione e dell'acqua nello scambiatore sono limitati, perciò l'ingresso di materiale molto umido abbasserebbe eccessivamente la temperatura di combustione. Inoltre un contenuto idrico troppo elevato può compromettere la fase di avvio, essendo tali caldaie dotate di un dispositivo di accensione automatica elettrico. Il contenuto idrico del cippato dovrebbe essere quanto più omogeneo possibile in quanto, maggiore è la sua eterogeneità e maggiori sono i costi di investimento per avere una tecnologia in grado di gestire il più complesso processo di combustione. Benché le caldaie a griglia fissa riescano a bruciare cippato fresco, maggiore è il contenuto idrico del cippato maggiore è la perdita di efficienza del processo di conversione energetica, in quanto parte dell'energia deve essere consumata per far evaporare l'acqua dal legno. E' il sistema più adatto e conveniente per le industrie della lavorazione del legno, soprattutto per le gamme di potenza medio piccole. La speciale struttura del focolare impedisce la formazione di scorie anche nel caso di materiale molto secco e trucioli. Costituiscono un sistema economico anche per la combustione di biomassa proveniente dal bosco.

Le caldaie a griglia mobile impiegate soprattutto in contesto industriale grazie alla maggiore facilità di movimentazione, del minor grado di rimescolamento del combustibile e della più agevole rimozione delle ceneri. E' il sistema ideale se si vuole utilizzare convenientemente gli assortimenti legnosi direttamente dal bosco alla caldaia, essendo un impianto di facile manutenzione e con una elevata tollerabilità di combustibile. La camera di combustione rotante migliora la combustione e quindi il rendimento nominale utile della caldaia: si tratta di caldaie indicate per ogni tipo di biomassa e per potenze elevate oltre i 2000 kW. In questa situazione praticamente l'avanzamento si realizza per gravità sagomando e disponendo opportunamente gli elementi sulla griglia (rendimenti intorno al 70%).

2) Impianti di combustione a letto fluido

Il combustibile viene mantenuto in sospensione tramite un flusso d'aria dal basso verso l'alto e comporta l'impiego di un vettore solido che, trascinato dall'aria comburente, viene a contatto con il combustibile. Si utilizza della sabbia silicea con

dimensione dei grani inferiore a 1 mm. Consente di trattare varie tipologie di biomassa inclusi i materiali più scadenti, quali ligniti, torbe, residui solidi urbani, fanghi, prodotti con elevata umidità. La camera di combustione è parzialmente riempita da un materiale inerte, come sabbia, che viene fluidificato dall'aria comburente in modo da costituire un letto bollente che viene rimesso in circolazione nella camera di combustione. Il combustibile viene mantenuto in sospensione tramite un flusso d'aria dal basso verso l'alto, utilizzo della sabbia silicea con dimensione dei grani inferiore a 1 mm.

3) La combustione in sospensione

Tecnologia indicata per biomasse leggere e polverulenti, quali lolla di riso, segatura, paglia. La biomassa inserita nella parte superiore del combustore brucia cadendo sulla griglia sottostante.

4) La combustione a tamburo rotante

Utilizzate nelle applicazioni che prevedono l'impiego di combustibile dalle scarse caratteristiche termo-fisiche e contenente elevati inquinanti. A causa del rimescolamento continuo, generato dalla rotazione del tamburo, la combustione avviene in maniera completa con diminuzione degli incombusti.

5) La combustione a doppio stadio

Tecnologia nella quale si verificano, in una prima camera, gassificazione e pirolisi, poi, in corrispondenza di una seconda camera a valle, si ha la completa combustione dei prodotti gassificati, dove avviene anche il trasferimento dell'energia a fluido vettore.

La **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 della carenza di ossigeno), di una sostanza in ambiente ad elevata temperatura (900÷1'000°C). Il prodotto risultante è un gas combustibile (detto gas di gasogeno o syngas) caratterizzato da un potere calorifico inferiore variabile.

Nel processo della **pirolisi**, attraverso l'azione del calore, a temperature elevate (tra 400 e 800°C) e in completa assenza degli agenti ossidanti (aria o ossigeno) o con una ridottissima quantità di ossigeno (in questo caso il processo può essere descritto come una parziale gassificazione), si ottengono prodotti gassosi, liquidi e solidi che successivamente vengono utilizzati come combustibili.

1.2.3. La cogenerazione e la microcogenerazione distribuita

Per cogenerazione si intende la produzione combinata in un unico processo di energia elettrica, termica e, anche se più di rado, meccanica (CHP: Combined Heat and Power): gli impianti di cogenerazione, rispetto a soluzioni con impianti separati, operano il recupero delle perdite di calore derivanti dal processo di generazione dell'elettricità e sono in grado quindi di accrescere il rendimento del processo produttivo massimizzando il coefficiente di utilizzo del combustibile di cui sfruttano al massimo il potenziale energetico. Il calore recuperato viene impiegato all'interno di processi industriali o per usi civili. Può accadere anche il contrario impiegando il calore residuo, prodotto per soddisfare il fabbisogno di processi ad alta temperatura, per la generazione di energia elettrica.

Per cogenerazione distribuita s'intende la produzione combinata di elettricità e calore attuata in piccoli impianti dislocati direttamente presso le utenze; per multi-generazione distribuita si intende la produzione combinata di raffreddamento, di calore ed elettricità (Chicco e Mancarella, 2009)

Attraverso l'accorpamento delle due fasi produttive ed il recupero delle perdite, 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, e una riduzione significativa delle emissioni (Roselli et al., 2011).

Gli impianti di cogenerazione vengono classificati sulla base della potenza in:

1. micro-cogenerazione: capacità massima $< 50 \text{ kW}_e$
2. piccola-cogenerazione: capacità massima $< 1 \text{ MW}_e$
3. media-cogenerazione: impianti con potenza compresa tra 1-10 MW_e
4. grande-cogenerazione: capacità massima $> 10 \text{ MW}_e$

La direttiva comunitaria 8/2004 (Consiglio Europeo, 2004) definisce cogenerazione ad alto rendimento quella connessa a impianti di piccola o micro cogenerazione ($< 1 \text{ MW}_e$) che forniscono un risparmio di energia primaria, e a impianti $\geq 1 \text{ MW}_e$ che forniscono un risparmio di energia primaria pari almeno al 10%, rispetto ai valori di riferimento per la produzione separata di elettricità e calore.

Tra le tipologie impiantistiche della cogenerazione distribuita quelle adatte alla microgenerazione (potenza $< 1 \text{ MW}$) sono:

1- Motori a combustione interna (MCI): utilizzano “cicli diesel” o “cicli otto a metano”, i primi sono meno utilizzati dei secondi, pur avendo rendimenti elettrici

superiori, a causa delle peggiori performance gestionali e ambientali. Il costo d'investimento iniziale è basso, presentano un buon rapporto energia elettrica/termica e rapidi tempi di avviamento/spengimento.

2- Microturbine a gas: sono caratterizzati da minori costi di gestione e basse emissioni di NO_x rispetto ai precedenti. Presentano rendimenti elettrici limitati e relativamente costanti al variare del carico. I costi elevati rappresentano attualmente i maggiori ostacoli per la diffusione di questa tecnologia.

3- Celle a combustione: sono dispositivi elettrochimici che consumano idrogeno, caratterizzati da elevati rendimenti, bassissime emissioni, flessibilità e bassi costi di gestione. Gli ostacoli fondamentali da superare sono invece i costi di produzione, ancora troppo elevati, ed i problemi connessi alla resistenza alla corrosione e/o agli stress termici.

La cogenerazione può essere applicata con successo al teleriscaldamento che consiste nella distribuzione, attraverso una rete di tubazioni isolate e interrato, di acqua calda, acqua surriscaldata o vapore (detti fluido termovettore) da una centrale di produzione alle abitazioni per poi fare ritorno alla stessa centrale. Le centrali di produzione possono sfruttare diversi combustibili per produrre il calore necessario: gas naturale, oli combustibili, carbone, biomassa o anche rifiuti.

Lo sviluppo della micro-cogenerazione a livello locale rappresenta la chiave di svolta per l'avvio della produzione energetica da fonti rinnovabili: negli ultimi 10 anni lo sviluppo tecnologico si è orientato verso unità produttive sempre più piccole favorendo un sistema di generazione distribuita con centrali di piccole e piccolissime dimensioni a discapito del sistema centralizzato.

Le biomasse possono andar ad alimentare con successo centraline di cogenerazione caratterizzate da una caldaia di medie dimensioni (da 500 a 1000 kW termici) e da un motore capace di trasformare energia calorica in energia meccanica ed al quale è associato un generatore di corrente da circa 75-150 kW di potenziale elettrico (Enama, 2010).

Nel 2005 la produzione nazionale netta di energia termoelettrica, esclusa la geotermoelettrica, è stata pari a 239.808,8 GWh di cui il 38% (91.437 GWh) proveniente da cogenerazione.

Sul territorio nazionale sono presenti 209 impianti di piccola generazione (potenza inferiore a 1 MW) di cui però 182 impiegano fonti non rinnovabili.

I vantaggi e le potenzialità legate a questa emergente tecnologia sono principalmente connessi alla possibilità di sfruttare risorse locali e rinnovabili con la riduzione delle spese di trasporto e delle perdite di rete, una minor dipendenza dalle importazioni e la creazione di nuove prospettive occupazionali diffuse sul territorio.

Nonostante i vantaggi della micro-cogenerazione distribuita in termini di sostenibilità e risparmio energetico, e quindi di emissioni di CO₂ e sicurezza nell'approvvigionamento, la diffusione su larga scala di questa soluzione è però ostacolata da barriere di tipo burocratico-istituzionale, dalla necessità di competenze specifiche da parte degli utenti e dai maggiori costi d'impianto.

1.3 - La metodologia LCA

Nel presente capitolo viene descritta la metodologia impiegata nella tesi per valutare gli impatti ambientali della filiera legno-energia oggetto di studio. In particolare, viene analizzata la metodologia "Analisi del ciclo di vita" (Life cycle assessment-LCA), richiamando le norme UNI EN 14010:2006 e UNI EN ISO 14044:2006.

1.3.1 LCA: Life Cycle Assessment

L'analisi del ciclo di vita è una valutazione che nasce a seguito della crescente attenzione, da parte dei soggetti pubblici e privati, ai temi energetici, ai cambiamenti climatici, ai consumi idrici, allo sfruttamento del suolo e, più in generale, al tema della sostenibilità ambientale dei processi produttivi e all'esigenza di garantire, nei vari settori, il rispetto delle risorse naturali. In particolare, negli ultimi decenni, è aumentato l'interesse verso lo sviluppo di metodi e tecniche che permettano di comprendere, valutare e conseguentemente ridurre i possibili impatti ambientali dei processi produttivi realizzati e che, contemporaneamente, consentano di attribuire ai prodotti un valore ambientale oggettivo, riconoscibile e spendibile sul mercato.

Anche da un punto di vista imprenditoriale la sostenibilità dei processi produttivi sta assumendo sempre più un valore significativo. Fino a pochi anni fa i problemi relativi alla compatibilità ambientale delle attività produttive erano fortemente sottovalutati, a causa di una percezione limitata ai soli aspetti antieconomici e, soprattutto, alla mancanza di normative in grado di incidere in maniera significativa sul rinnovamento

attento alle problematiche ambientali. La diffusione di una “coscienza ambientale” a tutti i livelli della società, la crescente domanda di prodotti di qualità ottenuti con processi sostenibili da parte dei consumatori, una nuova possibilità di sviluppo per le imprese che fanno della loro responsabilità ambientale un fattore di competitività, l’entrata in vigore di normative europee che hanno standardizzato la metodologia di valutazione, sono tutti elementi che hanno contribuito ad avviare un nuovo approccio centrato sulla compatibilità tra sistema produttivo ed ambiente e teso verso lo sviluppo sostenibile.

In questo nuovo approccio è necessario accompagnare il processo di produzione dei vari prodotti e servizi da una corretta stima degli impatti ambientali che il processo stesso comporta; tale stima può essere svolta attraverso una Valutazione del Ciclo di Vita (LCA – Life Cycle Assessment). Questa metodologia consente di determinare e quantificare i carichi energetici ed ambientali, concreti e potenziali, presenti nelle varie fasi del ciclo di produzione e consumo della bioenergia, considerate correlate e interdipendenti. Attraverso l’LCA, quindi, si quantificano gli effetti ambientali dei flussi in entrata e in uscita dal sistema produttivo ricorrendo ad opportuni indicatori d’impatto. Tale tecnica, applicata nell’ambito delle energie rinnovabili, permette di confrontare il profilo ambientale delle varie bioenergie con quello di energie fossili che svolgono analoghe funzioni. Questa comparazione fornisce utili indicazioni per la scelta delle tecnologie che meglio s’integrano con il concetto di sviluppo sostenibile.

1.3.1.1. Cenni storici

Attualmente la metodologia LCA è sempre più utilizzata ed affermata anche se la sua istituzione e codificazione è abbastanza recente. Le origini dell’LCA, infatti, si possono far risalire agli inizi degli anni Sessanta, e precisamente al 1963, quando fu presentata alla World Energy Conference una relazione, compilata da Harold Smith, riguardante le richieste di energia per la produzione di intermedi chimici, con alcuni marginali richiami alla valutazione degli impatti sull’ambiente.

Nel 1969, un gruppo di ricercatori nordamericani condusse studi, denominati REPA (Resource and Environmental profil Analysis), che avevano come obiettivo la caratterizzazione del ciclo di vita di alcuni materiali impiegati in importanti produzioni industriali. Tra le molte ricerche REPA merita ricordare quelle commissionate dalla Coca-Cola Company al Midwest Research Institute (USA) che,

confrontando diversi tipi di contenitori per le bevande, aveva lo scopo di determinare quale fosse l'involucro con il minor impatto sull'ambiente in termini di emissioni e di consumo di materie prime. Il calcolo fu realizzato quantificando le materie prime, il combustibile e i rilasci nell'ambiente per la produzione di ogni singolo contenitore. La metodologia applicata oltre a considerare le implicazioni ambientali introduceva la valutazione dell'energia intesa come risorsa naturale e, quindi, limitata.

Nel frattempo anche in Europa furono condotti studi simili, rivolti soprattutto ai sistemi d'imballaggio e denominati procedure di Ecobalance.

In seguito, la prospettiva di un rapido esaurimento dei combustibili fossili e di eventuali modificazioni climatiche, da attribuire soprattutto all'eccesso di calore immesso nell'atmosfera da parte dei processi di combustione, spinsero gli studi a calcoli meticolosi sui consumi energetici e sui rifiuti termici delle industrie e, soprattutto, alla messa a punto sia di metodologie sia di strumenti che potessero in qualche modo correggere l'approccio della teoria economica classica a questo tipo di fenomeni. Negli anni ottanta crebbe così l'interesse per l'LCA quale metodo per la valutazione quantitativa degli impatti riguardo a differenti tematiche ambientali (impoverimento delle risorse, riscaldamento globale, ecc.) nell'ottica di un approccio di sviluppo sostenibile.

Negli anni 80, in Europa, venne pubblicato il manuale di Analisi Energetica di Boustead e Hancock che riporta la prima descrizione di carattere operativo del procedimento, considerato una pietra miliare nella storia della metodologia LCA (Boustead e Hancock, 1979).

Alla fine degli anni Ottanta permaneva, tuttavia, una situazione di elevata confusione: rapporti riguardanti LCA condotti sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti. Il motivo di ciò era da attribuirsi alla scarsa uniformità delle valutazioni, per cui gli studi effettuati si basavano su dati, metodi e terminologie fra di loro differenti. Divenne presto evidente la necessità di una metodologia univoca e standardizzata. Il dibattito scientifico fu portato avanti sotto il patrocinio della SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) e uno dei risultati più importanti fu la pubblicazione di un quadro di riferimento internazionalmente accettato (SETAC, 1993).

Il diffondersi dell'utilizzo della metodologia LCA è, tuttavia, frutto anche dell'unificazione e standardizzazione della normativa di riferimento, da parte dell'ISO

(International Standards Organization), mediante l'emanazione, a partire dal 1997, della normativa tecnica della serie ISO 14000 e successivamente, tra il 1998 e il 2000, le norme specifiche di prodotto della serie 14040; le norme di riferimento per un'analisi del ciclo di vita sono due, la ISO 14040:2006-Principles and framework e la ISO 14044- Requirements and guidelines.

Attualmente la Commissione europea considera l'approccio LCA come l'unico in grado di fornire una base scientifica per comprendere il carico ambientale di prodotti e processi in un'ottica complessiva; l'LCA è lo strumento accettato dalla comunità scientifica internazionale per l'identificazione delle strategie, private e pubbliche, volte alla ricerca di efficienza ambientale, per la riduzione del consumo di risorse ed energia e per minimizzare gli effetti sull'ambiente secondo gli attuali standard aziendali (Baldo et al., 2008).

1.3.1.2. Definizione di LCA

Secondo la SETAC “[...] *l'LCA è un processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, di energia e delle emissioni nell'ambiente, e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del prodotto (“dalla culla alla tomba”): dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e collocazione finale del prodotto dopo l'uso [...]”* (SETAC, 1993).

Da questa definizione risulta evidente come il concetto di valutazione, che sta alla base del metodo, sia strettamente connesso con quello di confronto, perciò, l'LCA dovrebbe essere inteso correttamente come una comparazione il più possibile completa tra due o più prodotti, gruppi di prodotti, sistemi, metodi o approcci alternativi, volta a rivelare i punti deboli, a migliorare le qualità ambientali, a promuovere prodotti e processi ecologici, a comparare approcci alternativi e dare fondamento alle azioni suggerite nell'ottica del miglioramento continuo e dello sviluppo sostenibile.

L'affermarsi dell'LCA è, quindi, in qualche modo legato al verificarsi di tre eventi principali:

- la crescente consapevolezza che i problemi ambientali non possono più essere affrontati per singoli comparti (aria, acqua, suolo) ma richiedono una valutazione e interventi globali;
- la nuova attenzione alle politiche di prodotto come importante componente delle politiche ambientali;
- la presenza di un'opinione pubblica che richiede informazioni ambientali e di consumatori che scelgono le merci e i servizi che vengono loro offerti in base a criteri di qualità ambientali.

La metodologia LCA offre numerose possibilità di utilizzo :

- ✓ la valutazione dell'impatto ambientale di prodotti differenti, aventi la medesima funzione;
- ✓ la valutazione dell'impatto ambientale dell'uso differente dello stesso prodotto;
- ✓ l'identificazione, all'interno del ciclo produttivo o del ciclo di vita del prodotto, dei momenti in cui si registrano gli impatti più significativi, a partire dai quali possono essere indicati i principali percorsi verso possibili miglioramenti, intervenendo sulla scelta dei materiali, delle tecnologie e degli imballaggi;
- ✓ il sostegno alla progettazione di nuovi prodotti;
- ✓ la segnalazione di direzioni strategiche per lo sviluppo, che consentano risparmi, sia per l'azienda, sia per il consumatore;
- ✓ la dimostrazione di aver ottenuto un ridotto impatto ambientale ai fini dell'attribuzione del marchio ecologico comunitario (Ecolabel, EPD);
- ✓ il perseguimento di strategie di marketing in relazione al possesso di Ecolabel;
- ✓ il sostegno nella scelta dei procedimenti per il disinquinamento;
- ✓ il supporto nella scelta delle soluzioni più efficaci e idonee per il trattamento e la gestione integrata dei rifiuti;
- ✓ la base oggettiva di informazioni e di lavoro per l'elaborazione dei regolamenti che riguardano l'ambiente;
- ✓ il sostegno alle politiche ambientali territoriali;

L'LCA, quindi, non è solo uno strumento per la salvaguardia dell'ambiente, ma può diventare anche un importante mezzo per il rafforzamento delle dinamiche competitive, mediante adeguate azioni di marketing, nonché per la riduzione e il

controllo dei costi (Blengini e Busto, 2009; Canals et al., 2006) e per il sostegno alle politiche ambientali territoriali (Recchia et al., 2010).

Inevitabilmente il tipo di informazione fornita sarà un indicatore di tipo semplificato, in quanto ipotesi e assunzioni di lavoro tendono per loro natura a semplificare o trascurare parti di sistema reale, coerentemente con quanto stabilito dagli obiettivi del lavoro e con le risorse a disposizione. Nonostante questo, con la LCA è possibile ottenere una comprensione adeguata circa l'impatto ambientale di un certo prodotto. Lo scopo, i confini ed il livello di dettaglio di un LCA dipendono dall'oggetto dello studio e dall'uso per il quale è stato predisposto; tuttavia, sebbene la profondità e l'ampiezza dell'indagine possano variare molto a seconda dei casi, lo schema cui si fa riferimento rimane sempre il medesimo.

Del resto ogni tecnica di valutazione presenta necessariamente delle limitazioni, che è indispensabile conoscere e tenere in adeguata considerazione durante il procedimento di analisi, in particolare la valutazione del ciclo di vita presenta i seguenti limiti:

- ✓ i modelli utilizzati per l'analisi inventariale o per valutare impatti ambientali sono limitati dalle assunzioni implicitamente contenute in essi;
- ✓ l'accuratezza di uno studio di LCA può essere limitata dall'accessibilità o dalla disponibilità di informazioni rilevanti o di qualità elevata (scarsità dei dati e scarsa conoscenza del fenomeno oggetto di studio);
- ✓ la mancanza di una dimensione spaziale e temporale nell'inventario dei dati utilizzati per la valutazione dell'impatto introduce incertezza sui risultati dell'impatto;
- ✓ non è possibile un'assoluta e completa rappresentazione di ogni effetto sull'ambiente in quanto esso si basa su un modello scientifico che costituisce una semplificazione di un sistema fisico vero.

In generale, le informazioni ottenute attraverso uno studio di LCA dovrebbero essere usate come componente di un processo decisionale molto più ampio ed essere utilizzate per comprendere nel loro insieme gli scambi globali. Confrontare i risultati di differenti studi di LCA è possibile solamente se le assunzioni e il contesto di ciascuno studio sono i medesimi; per questo motivo le assunzioni alla base di ogni studio dovrebbero essere sempre esplicitamente dichiarate.

1.3.1.3. Struttura LCA e fasi

Da un punto di vista metodologico, la definizione di LCA proposta originariamente dalla SETAC, successivamente ripresa dalle norme ISO 14040 e 14044, è la seguente: *“una LCA è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi a un processo o un’attività, effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La valutazione include l’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”*.

La definizione specifica riportata nella normativa ISO 14040 esprime la LCA come una *“compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto”*.

Una LCA applicata a un sistema produttivo o di prodotti indirizza dunque lo studio di efficienza del sistema in oggetto verso la salvaguardia della salute dell’ambiente e dell’uomo nonché verso il risparmio di risorse. Per sistema di prodotti si intende un insieme di procedure, la cui funzione principale è la produzione di beni utili: esso è separato dal sistema ambiente da confini fisici ben definiti ed è ad esso collegato grazie allo scambio di input e di output (figura 6). In quest’ottica l’ambiente non è quello naturale definito dall’ecologia, ma è tutto ciò che sta all’esterno del sistema di prodotti considerato.



Fig. 6 Interazione fra un sistema di prodotti e l’ambiente

Risulta, quindi, chiaro come gli input del sistema siano parametri che intervengono nel dibattito sui problemi del risparmio delle risorse mentre gli output riguardino i problemi di inquinamento e si comprende come la definizione della funzione del sistema e dei confini dello stesso rappresentino le operazioni chiave per la buona riuscita di uno studio di LCA.

In sintesi, più che descrivere il prodotto una LCA descrive il sistema che lo genera o, in altre parole, le procedure del sistema stesso. Questo è importante da chiarire, per

evitare il rischio di identificare l'analisi del ciclo di vita dei processi con un'analisi del ciclo di vita dei prodotti. Il modello del sistema oggetto di indagine in una LCA risulta sempre una semplificazione della realtà, poiché non include una rappresentazione completa delle interazioni con l'ambiente, ma solo quelle più significative. Importante è analizzare il processo, sia che interessi la sfera della produzione o quelle della distribuzione e utilizzazione, in maniera affidabile ed efficace in modo da progettare il miglioramento del sistema indagato (Roy et al., 2009).

La struttura moderna della LCA proposta dalla norma ISO 14040 e successive è sintetizzabile in quattro momenti principali (figura 7):

1. **Definizione degli scopi e degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio (Goal and Scope Definition):** è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
2. **Analisi di inventario (Life Cycle Inventory Analysis, LCI):** è la parte del lavoro dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività; lo scopo principale è di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell'energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto. Redigere un inventario di ciclo di vita significa costruire un modello del sistema reale che si intende studiare: si compila quindi un inventario degli ingressi, cioè i materiali, energia, risorse naturali ed un inventario delle uscite, cioè emissioni in aria, acqua e suolo.
3. **Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA):** è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività ed ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati dall'inventario. È la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale. Gli impatti calcolati sono potenziali, diretti ed indiretti, associati agli input e agli output.
4. **Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Interpretation):** è la parte conclusiva di una LCA che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati, valutandoli in

modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto. In pratica è la definizione delle linee di intervento.



Fig.7 Struttura della LCA proposta dalla norma ISO14040

La descrizione della struttura concettuale dell'Analisi del Ciclo di Vita è riportata nel documento UNI ISO 14040 e collegati, e si articola secondo lo schema della tabella 1.

<i>Goal and Scope Definition ISO 14041</i>	<i>Life Cycle Inventory ISO 14041</i>	<i>Life Cycle Impact Assessment ISO 14042</i>	<i>Life Cycle Interpretation ISO 14043</i>
Definizione degli obiettivi dello studio	Preparazione raccolta dati e definizione del diagramma di flusso	Selezione e definizione delle Categorie di Impatto	Identificazione degli impatti più significativi
Definizione del campo di applicazione dello studio	Raccolta dati	CLASSIFICAZIONE Assegnazione di una o più categorie d'impatto ai dati raccolti nell'inventario	Valutazione della metodologia e dei risultati (completezza, sensibilità, consistenza)
Funzioni del prodotto Unità funzionale Flusso di riferimento	Procedimenti di calcolo dei flussi di input ed output	CARATTERIZZAZIONE E Quantificazione dell'impatto	Analisi di sensibilità
Confini iniziali del sistema	Analisi di sensibilità e correzione dei confini del sistema	NORMALIZZAZIONE Analisi tecnica della significatività (opzionale)	Reiterazione del ciclo di vita in caso che i tre punti precedenti non siano soddisfatti
Categorie di dati	Allocazione dei flussi e dei rilasci	VALUTAZIONE Assegnazione di un peso relativo alle varie categorie d'impatto (opzionale)	Conclusioni e raccomandazioni Relazione sullo studio
Scelta iniziale dei flussi in ingresso e uscita	Interpretazione dei risultati e analisi dell'incertezza		
Requisiti di qualità dei dati	Relazione sullo studio		
Revisione critica			

Tab.1 Struttura concettuale della Valutazione del Ciclo di Vita

1.3.1.3.1 Prima fase di una LCA: definizione scopi, obiettivi e campo di applicazione (ISO 14041)

La dichiarazione esplicita degli obiettivi e delle finalità dello studio rappresenta il primo importante momento di pianificazione di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto o processo.

A tal proposito la norma ISO 14040 definisce : *“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”*.

E' evidente come gli obiettivi dello studio influenzino notevolmente le scelte e le ipotesi di lavoro, in quanto a seconda delle motivazioni, del pubblico a cui è destinato, delle risorse a disposizione e delle aspettative nei risultati, possono risultare scenari anche molto diversi. Pertanto, è molto importante definire con precisione i confini della ricerca e, quindi, quelli del sistema oggetto di studio nonché del grado di approfondimento dello studio. Una volta noti gli obiettivi dell'analisi occorre definire il “campo di applicazione dello studio”, che rappresenta una sorta di carta d'identità dello studio con indicati i requisiti, i limiti e le ipotesi iniziali.

Per definire il “campo di applicazione dello studio” occorre dare la definizione di “sistema”, di “unità funzionale” e di “confini del sistema”.

Nell'LCA viene definito “sistema” un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più operazioni aventi una specifica funzione; il sistema è determinato da confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input e di output. Nel caso di un sistema di prodotti, si tratta di un sistema i cui input consistono in materie prime e in energia primaria e i cui output consistono in reflui (calore disperso, emissioni in acqua e aria, rifiuti solidi) che ritornano al sistema ambiente (biosfera). Un sistema al cui interno sono presenti tutti i processi di trasformazione, da quelli dei produttori a quelli dei prodotti finali. Tra i suoi output non esistono prodotti utili ma solo reflui (figura 8).



Fig. 8 Sistema di prodotto

I sistemi di prodotti e/o processi contengono un gran numero di operazioni collegate tra loro, anche in modo complesso, dai flussi di materiali, di energia e di prodotti finiti. Per la definizione del sistema occorre effettuare un inventario di ciclo di vita definendo innanzitutto le singole operazioni che lo compongono in qualità di operazioni unitarie: ognuna di queste riceve i propri input dalle operazioni unitarie a monte, mentre i suoi output serviranno ad alimentare quelle seguenti, secondo lo schema di produzione. Definire i confini del sistema significa determinare le unità di processo che devono essere considerate dallo studio. Tali unità devono essere esplicitamente elencate per evitare di paragonare sistemi che non sono confrontabili. Le funzioni del sistema rappresentano le caratteristiche e le prestazioni del processo e/o prodotto.

“L’unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita. Il suo scopo principale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata e in uscita. Tale riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati di una LCA. Tale comparabilità è particolarmente critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che i confronti siano fatti su una base analoga. Un sistema può avere un gran numero di funzioni possibili e la funzione scelta per lo studio dipende dall’obiettivo e dal campo di applicazione. La corrispondente unità di misura deve essere definita e misurabile” (ISO 14040).

L’unità funzionale, quindi, indica il riferimento rispetto al quale normalizzare i dati che compongono il bilancio ambientale del sistema in esame. L’unità funzionale deve essere rappresentativa di una prestazione quantificabile e oggettivamente riscontrabile di un prodotto e/o processo, al fine di consentire la comparabilità dei risultati dell’LCA. La scelta di tale unità è arbitraria e dipende essenzialmente dallo scopo per cui i sottosistemi e il sistema globale sono stati progettati, e può essere intesa come un indice delle prestazioni svolte dal sistema. La sua definizione risulta quindi fondamentale per la buona riuscita dello studio.

Oltre all'unità funzionale, la norma ISO 14040 introduce il concetto di "flusso di riferimento" che in pratica è la quantità di bene o di servizio necessario per ottenere l'unità funzionale scelta.

I "confini del sistema" determinano invece le unità di processo che devono essere incluse nell'LCA e le loro interrelazioni; spesso è utile rappresentarle attraverso un diagramma di flusso per visualizzare facilmente il campo di azione delineato. Una prima delimitazione dei confini avverrà nell'ambito della ricerca degli ambienti fisici e dei processi produttivi che si ritiene di dover considerare per l'analisi. Successivamente sarà possibile escludere componenti che si dimostreranno non rilevanti o per cui risulta troppo oneroso ottenere un'informazione dettagliata, oppure includerne altre alle quali inizialmente non si era attribuita un'adeguata importanza. Resta inteso comunque che la scelta del confine dell'analisi debba essere adeguatamente motivata e sempre segnalata nello studio. E' possibile ora ribadire che ogni LCA contiene di fatto delle semplificazioni e limitazioni per renderla gestibile rispetto a una LCA dell'intero sistema globale che non sarà mai riproducibile per intero. Dunque l'obiettivo iniziale di una LCA è quello di ripercorrere a ritroso tutte le filiere produttive del sistema indagato fino all'estrazione delle materie prime nel modo più completo possibile e stimare l'errore che si compie trascurando alcune unità di processo. La ISO è molto chiara in proposito : *"i criteri adottati nello stabilire i confini del sistema devono essere identificati e giustificati nel campo di applicazione dello studio"*.

E' importante sottolineare che anche il periodo di riferimento dell'analisi costituisce un vincolo nella scelta dei confini dell'analisi come pure la qualità dei dati e affidabilità dei dati a disposizione o che possono essere rilevati. Questa verifica è importante per stabilire l'affidabilità dei risultati dello studio; spesso, infatti, qualora la precisione delle informazioni sia scarsa o nulla, è necessario ricorrere alla letteratura. Sia nel caso in cui un analista LCA sia dotato di uno strumento di calcolo software che include una base di dati da cui attingere le informazioni, sia nel caso si abbiano a disposizione anche dati che possono essere utilizzate come sorgente di informazioni da inserire nel proprio modello, è importante poter qualificare la rappresentatività statistica del dato, la sua origine e tutti gli elementi necessari a una sua riproducibilità.

Infine, evidenziamo che attualmente gli studi in atto stanno cercando di trovare un codice che consenta di utilizzare contemporaneamente grandezze energetiche, ambientali ed economiche. L'approccio metodologico dell'LCA prevede ora soltanto l'impiego di grandezze energetiche ed ambientali con l'intento di collegarle a quelle economiche solo in un momento successivo e in modo indipendente.

1.3.1.3.2. Seconda fase di una LCA: analisi di inventario o Life Cycle Inventory-LCI (ISO 14041)

Questa fase è indubbiamente la più delicata e dispendiosa in termini di tempo di una LCA, in quanto rappresenta la base informativa su cui si innestano le fasi successive. Seguendo la definizione della ISO 14041, è proprio in questa fase che sono “*[...] individuati e quantificati i flussi in ingresso e in uscita da un sistema-prodotto, lungo tutta la sua vita [...]*”. Saranno quindi identificati e determinati i consumi di risorse (materie prime, prodotti riciclati e acqua), di energia (termica ed elettrica) e le emissioni in aria, acqua e suolo. Al termine la struttura assumerà l'aspetto di un vero e proprio bilancio ambientale. Il procedimento per condurre l'analisi d'inventario è iterativo. Man mano che i dati raccolti diventano più approfonditi ed il sistema è meglio conosciuto, possono essere identificati nuovi requisiti o limitazioni, che potranno anche comportare cambiamenti nelle procedure di raccolta dei dati, affinché siano ancora soddisfatti gli obiettivi dello studio.

L'inventario può essere suddiviso in quattro moduli:

1 - diagramma di flusso del processo (process flow-chart): il diagramma di flusso del processo consiste in una rappresentazione grafica e qualitativa di tutte le fasi rilevanti e di tutti i processi coinvolti nel ciclo di vita del sistema analizzato. È composto da sequenze di processi (boxes), collegati da flussi di materiali (arrows, frecce). La sua caratteristica fondamentale è quella di dividere un sistema in vari sottosistemi, esplicitare azioni d'interconnessione (le uscite di un sottosistema a monte sono le entrate di un sottosistema a valle) ed individuare le parti del processo dotate di maggiore rilevanza, soprattutto in termini ambientali, per evitare di attribuire il medesimo grado di attenzione indiscriminatamente a tutte le fasi;

2 - raccolta dati (data collection): normalmente la raccolta dei dati richiede un impegno elevato, in termini di tempo e di risorse, a causa della quantità di informazioni, spesso di difficile reperibilità, e della necessità di rilevare dati qualitativamente significativi.

Alcune ricerche evidenziano che i risultati di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto o di un processo dipendono, soprattutto, dalla qualità dei dati usati come input e, pertanto, dal contesto di riferimento (Chiaramonti e Recchia, 2010).

I dati raccolti possono essere distinti in tre categorie:

- ✓ dati primari, provenienti da rilevamenti diretti;
- ✓ dati secondari, ricavati sia dalla letteratura, come database di software specifici e manuali tecnici, sia da altri studi e da calcoli ingegneristici;
- ✓ dati terziari, provenienti da stime e da operazioni analoghe, da dati relativi a test realizzati in laboratorio, da statistiche ambientali e da valori medi.

Quando si raccoglie il set di dati è necessario controllare che questi siano concreti e coerenti: un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output.

Oltre agli impatti relativi al processo, devono essere definiti anche i dati riguardanti:

- ✓ impatti e consumi relativi all'energia elettrica importata nel sistema: è necessario chiarire quale sia il contesto di riferimento (Regionale, Nazionale, Comunitario) per procedere alla valutazione del mixing di combustibili che concorrono alla produzione del kW elettrico sfruttato, l'efficienza globale del sistema ed i relativi impatti sull'ambiente;
- ✓ impatti e consumi relativi al sistema di trasporto: i prodotti possono essere trasportati con differenti mezzi, a ciascuno dei quali corrisponde un certo impatto per unità di prodotto trasportato.

3 - definizione delle condizioni al contorno (system boundaries):

- ✓ definire il confine tra il sistema studiato e l'ambiente;
- ✓ definire il carico sull'ambiente del sistema indagato, rappresentato da tutte le prestazioni e le immissioni che avvengono durante l'intero ciclo di vita;
- ✓ definire il confine fra i processi ritenuti rilevanti e quelli irrilevanti: in questa fase si stabilisce ciò che deve essere incluso e ciò che invece deve essere trascurato. Si tiene in considerazione lo scopo dello studio, precedentemente definito, e ci si basa su considerazioni pratiche, fondate sull'opportunità di non coinvolgere elementi che di fatto non hanno alcuna rilevanza sostanziale sui risultati finali. Per esempio, nella definizione di una filiera di legno da biomasse residuali (potature di vite e di olivo) le fasi di taglio e di stoccaggio possono non

essere considerate in quanto operazioni che sarebbero state fatte comunque e, pertanto, non rilevanti ai fini della definizione del processo considerato (Recchia e Cini, 2005).

4. elaborazioni dei dati (data processing): raccolti i dati, questi vengono correlati a tutte le unità di processo che concorrono alla produzione dell'unità funzionale in studio (ad esempio l'ammontare di energia elettrica utilizzata nella produzione, i kg per km di prodotto e di co-prodotto che necessitano di trasporto, quanti kg di materie prime sono state utilizzati, ecc..) dove, per ciascuna unità di processo, si determinerà un'appropriata unità di misura per il flusso di riferimento (ad esempio 1 kg di materiale o 1 MJ di energia). Successivamente i dati riguardanti l'impatto vengono trasformati e riferiti all'unità funzionale di prodotto, attraverso la definizione di un fattore di contribuzione che esprime il contributo di ciascun processo rispetto alla produzione di un'unità funzionale, espressa attraverso l'unità di misura prescelta (ad es. 175 kWh/1000 kg)

Questo procedimento dovrà essere eseguito per tutte le sostanze presenti in ciascun processo.

Un problema che può presentarsi durante questa fase riguarda la ripartizione, definita **allocazione**, dei consumi e degli impatti relativi a prodotti differenti generati da uno stesso processo produttivo. È evidente l'importanza della conoscenza nel dettaglio del processo produttivo al fine di poter attribuire ad ogni prodotto ottenuto la quota spettante di materia prima ed energia consumata, quindi i rispettivi impatti in aria, acqua e rifiuti solidi. Quando ciò non risulti possibile, perché ad esempio, in uno stesso processo sono lavorate più categorie di prodotti, si procede ad una ripartizione dei consumi e dei relativi impatti attraverso una suddivisione che può tenere conto dei seguenti criteri:

- ✓ le quantità consumate sono assegnate in base al peso dei diversi prodotti, cioè per via ponderale;
- ✓ in base al valore economico di ciascun prodotto;
- ✓ in funzione dell'importanza dei vari prodotti.

Nel caso della cogenerazione, ad esempio, gli impatti ambientali valutati possono essere allocati tra i due prodotti, energia elettrica e energia termica, sulla base del loro contenuto di exergia. L'exergia descrive l'energia disponibile che è contenuta nell'elettricità e nel calore e che può essere quindi utilizzata.

Occorre tuttavia considerare che mentre nel caso dell'elettricità il suo contenuto di exergia è equivalente alla sua energia (1 kWh di elettricità ha valore di exergia 1), nel caso del calore, al contrario, l'exergia è data dalla sua energia moltiplicata per il fattore di Carnot il quale dipende dalla temperatura del calore generato e da quella dell'ambiente circostante:

$$\eta_c = (T - T_u)/T$$

dove T è la temperatura del vapore prodotto (K) e T_u è la temperatura dell'ambiente circostante (K).

Per questo motivo, nel caso della cogenerazione questo tipo di allocazione attribuisce maggiore importanza, in termini di valutazione degli impatti, alla produzione di energia elettrica la cui exergia risulta essere maggiore (Bayrak e Gungor, 2010; Pehnt, 2008).

I trasporti costituiscono un elemento vitale per la maggioranza dei processi produttivi industriali e spesso la quantità di energia a essi legata, e le conseguenti emissioni, rappresenta una parte significativa dell'energia complessiva spesa nel processo in esame. E' stato comunque dimostrato, attraverso compiuti studi sull'argomento, che se il trasporto su strada è contenuto entro i 100 km l'impatto ambientale che ne risulta non è molto significativo e non incide particolarmente sugli impatti del sistema nella sua interezza.

Un altro aspetto molto importante è quello che riguarda la quantificazione degli aspetti positivi associati al recupero di alcune tipologie di rifiuti. Per valutare i benefici del recupero di materia o di energia è consueto l'utilizzo della metodologia degli "**impatti evitati**". Dato un sistema che permette un recupero, mediante questo approccio si sottraggono dagli impatti ambientali generati quelli associati alla produzione dei flussi recuperati. Il risultato di questo approccio è quindi la valutazione degli impatti ambientali di un sistema tenuto conto anche, in termini quantitativi, dei benefici associati agli eventuali recuperi. A tal proposito è ancora da osservare come dovendo effettuare una sottrazione di impatti possa verificarsi un risultato negativo. Ovviamente questo dato deve essere interpretato osservando che in presenza di valore negativo il sistema produce minori impatti rispetto al sistema tradizionale.

1.3.1.3.3 Terza fase di una LCA: la valutazione d'impatto o Life Cycle Impact Assessment (ISO 14042)

La norma ISO definisce *“impatto ambientale una qualsiasi modificazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l'ambiente”*.

Un impatto è associato a uno o più effetti ambientali: per esempio la CO₂ emessa durante la combustione di una certa quantità di carbone provoca un impatto che contribuisce all'effetto serra. Poiché non è possibile correlare inequivocabilmente uno specifico impatto ai suoi effetti ambientali, ci si deve limitare ad affermare che l'impatto è ciò che prelude a un effetto, senza pretende di poter quantificare rigorosamente il secondo sulla base del primo. Mentre possiamo ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati della fase di analisi di inventario, i corrispondenti effetti ambientali potranno essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni.

Gli effetti dovuti alle sostanze rilasciate nell'ambiente si verificano nelle immediate vicinanze del punto di emissione oppure possono avere una ricaduta su tutto il pianeta. Quindi, gli effetti ambientali si suddividono in effetti globali (per es. le emissioni di CO₂), regionali o locali (emissioni di rumore); lo stesso effetto può essere analizzato a livello globale e locale come nel caso, ad esempio, dell'impatto di un sistema microgenerativo sulla qualità dell'aria (Pehnt, 2008).

La struttura concettuale della “valutazione di impatto” fa riferimento alla norma ISO 14042 che la definisce e la standardizza nelle fasi descritte di seguito :

1 - Selezione e definizione delle categorie di impatto: in questa prima fase sono identificate le categorie d'impatto prodotte dal sistema in esame. Per la definizione di queste categorie occorre rispettare tre caratteristiche:

- ✓ completezza: comprendere tutte le categorie, a breve e a lungo termine, su cui il sistema potrebbe influire;
- ✓ indipendenza: evitare intersezioni tra le categorie per non determinare conteggi multipli;
- ✓ praticità: la lista formulata non dovrà essere troppo dettagliata per non contemplare un numero eccessivo di categorie.

Per la scelta delle categorie può essere utile consultare il Working Group on LCIA della SETAC, all'interno della quale sono proposte e descritte numerose tipologie di impatto, come:

- ✓ estrazione di risorse abiotiche, comprendono tre differenti tipologie di elementi naturali: i depositi (combustibili fossili e minerali) considerati risorse limitate in quanto non rinnovabili nel breve periodo; le risorse (quali acque sotterranee, sabbia e ghiaia); le risorse rinnovabili (acque superficiali, energia solare, vento, correnti oceaniche);
- ✓ estrazione di risorse biotiche, cioè tipologie specifiche di biomassa raccolte sia in maniera sostenibile, sia in maniera non sostenibile (per es. deforestazione indiscriminata);
- ✓ uso del territorio, la cui gestione errata porta ad una riduzione del numero di specie animali e vegetali presenti, rispetto alle condizioni naturali;
- ✓ effetto serra, che comporta un aumento della temperatura nella bassa atmosfera conseguenza della presenza di alcuni gas, quali l'anidride carbonica, il metano, il biossido di azoto, che intrappolano le radiazioni infrarosse;
- ✓ impoverimento dell'ozono stratosferico, che ha come conseguenza l'incremento dell'incidenza dei raggi ultravioletti, dannosi per l'uomo e, in generale, per tutti gli ecosistemi;
- ✓ ecotossicità, provocata dalle emissioni dirette di sostanze tossiche, come metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi e sostanze liberate nel corso della degradazione dei prodotti;
- ✓ smog fotochimico, in cui si considerano tutti gli impatti derivanti dalla formazione di ozono troposferico, causata dalle reazioni di componenti organici in presenza di luce e di ossidi di azoto;
- ✓ tossicità umana, imputabile alla presenza di sostanze chimiche e biologiche e dipendente sia dal tipo di esposizione, sia dalla metodologia attraverso la quale avvengono le emissioni nell'ambiente;
- ✓ acidificazione, causata dal rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, principalmente attraverso la pioggia, con effetti per lo sviluppo della vita.
- ✓ arricchimento in nutrienti, causato da un eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili e di tutti quegli elementi nutritivi che portano ad un incremento nella produzione di plancton, alghe e piante acquatiche in genere.

Le varie tipologie di impatto possono essere raggruppate in alcune principali categorie (salute umana, qualità dell'ecosistema, sfruttamento delle risorse, ambiente di lavoro

ecc..) che possono differenziarsi a seconda della metodologia utilizzata. Ad esempio, l'Ecoindicator 99 si basa su una metodologia "damage-oriented", l'EPS200 valuta gli impatti da un punto di vista economico e l'EDIP si basa invece su targets ambientali specificati nei diversi protocolli internazionali. Queste diverse metodologie non solo individuano diverse categorie di impatti ma utilizzano anche approcci diversi in fase di caratterizzazione o normalizzazione degli impatti (Fantozzi e Buratti, 2010).

2 - Classificazione: è la fase di assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie di impatto ambientale, noti gli effetti e i danni potenziali delle emissioni alla salute umana, all'ambiente, all'impoverimento delle risorse, ecc.

Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto, saranno contenuti tutti gli input e output del ciclo di vita che contribuiscono allo sviluppo dei diversi problemi ambientali. La stessa sostanza o materiale potrebbe essere contenuta all'interno di più categorie di impatto.

3 - Caratterizzazione: essa si affianca alla fase della classificazione ed ha lo scopo di quantificare l'impatto generato. Essa trasforma, attraverso una serie di calcoli, le sostanze presenti nell'inventario, e precedentemente classificate, in indicatori di carattere numerico, attraverso la definizione del contributo relativo di ogni singola sostanza emessa e/o risorsa usata. Alcuni studi rilevano che esiste una correlazione significativa fra gli indicatori che valutano il consumo di materiali grezzi, poiché molti indicatori sono riferiti al consumo di combustibili fossili, e ciò può consentire di ridurre il numero degli indicatori utilizzati nell'analisi degli impatti. Non significativa è invece la correlazione tra risorse consumate e emissioni derivate per cui occorre utilizzare vari indicatori per valutare opportunamente gli impatti dell'uso delle risorse (Berger e Finkbeiner, 2011).

L'operazione viene effettuata moltiplicando i pesi delle sostanze emesse, e/o consumate nel processo, per i relativi fattori di caratterizzazione, propri di ogni categoria di impatto. In sintesi, il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato, ed è stabilito da un'Authority sulla base di considerazioni di carattere prettamente scientifico.

Si elencano di seguito, a titolo esemplificativo, i fattori peso per le varie categorie di impatto proposti dal metodo CML, nell'ottobre 1992:

- Per la categoria estrazione di risorse abiotiche, il *rapporto utilizzo/riserva* W_j , espresso dalla relazione: $W_j = G_j/R_j$ dove: G_j è il consumo corrente globale del

minerale j ; R_j è la riserva del minerale j .

- Per la categoria estrazione di risorse biotiche, non è ancora stata realizzata una determinazione attendibile: si potrebbe definire un indicatore basato sulla rarità e sul tasso di rigenerazione della risorsa.
- Per l'effetto serra viene usato il parametro *Potenziale di Riscaldamento Globale* (*Global Warming Potential, GWP*), che definisce la potenziale influenza di una sostanza, valutata in termini relativi rispetto alla CO_2 , secondo orizzonti temporali di 20, 100 e 500 anni; questo per tenere conto del fatto che le varie sostanze si decompongono e inattivano solo in periodi di tempo molto lunghi.
- Per l'impoverimento dell'ozono è stato introdotto il parametro *Potenziale di Riduzione dell'Ozono stratosferico* (*Ozone Depletion Potential, ODP*): la sostanza di confronto rispetto alla quale si valuta l'effetto delle altre è il CFC11.
- Per l'effetto dell'ecotossicità sono stati introdotti i seguenti parametri: ECA (*Aquatic Ecotoxicity*) [m^3/kg], per la valutazione della tossicità delle acque; ECT (*Terrestrial Ecotoxicity*) [m^3/kg], per la valutazione della tossicità del terreno. Per semplicità si utilizza un solo parametro, l'ECA, poiché la maggior parte delle emissioni nel terreno contamina le falde acquifere.
- Per la tossicità umana sono stati ideati gli indici: HCA (*Human-toxicological Classification value for Air*), indice di classificazione per le sostanze emesse in aria; HCW (*Human-toxicological Classification value for Water*), indice di classificazione per le sostanze emesse in acqua; HCS (*Human-toxicological Classification value for Soil*), indice di classificazione per le sostanze emesse nel terreno. Essi forniscono un'indicazione di massima e non hanno la pretesa di essere del tutto precisi e affidabili.
- Per lo smog fotochimico si usa il parametro *Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico* (*Photochemical Ozone creation potentials, POCP*), per i componenti organici. Tale parametro è espresso per le diverse sostanze in termini di equivalenza con l'etilene (C_2H_4).
- Per la categoria acidificazione è usato il fattore *Potenziale di Acidificazione* (*Acidification Potential, AP*), stimato per ogni sostanza in termini di SO_2 oppure in termini di mole di H^+ .
- Per l'eutrofizzazione si usa il *Potenziale di Eutrofizzazione* (*Eutrophication*

Potential, EP) espresso in termini di impoverimento in O₂, oppure in PO₄.

Gli indicatori citati sono, per la maggior parte, gli stessi utilizzati all'interno del metodo degli Eco-indicator 99 e del ReCiPe utilizzato nello studio.

Il risultato della fase di caratterizzazione è il profilo ambientale, costituito da una serie di punteggi di impatto ambientale relativi a ciascuna categoria, ottenuti sommando tra loro tutti i singoli contributi precedentemente calcolati. Solitamente viene rappresentato graficamente attraverso una serie di istogrammi oppure attraverso un network con frecce di diverso spessore a indicare quale attività comporta l'impatto maggiore.

5 - Normalizzazione: in questa fase i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono normalizzati, cioè divisi per un "valore di riferimento" o "effetto normale" rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, europea o regionale, riferiti ad un determinato intervallo di tempo (per es. dati medi relativi all'esaurimento fonti energetiche, effetto serra, ossidanti fotochimici, acidificazione, tossicità umana ecc..). Attraverso la normalizzazione si può stabilire la magnitudo, ossia l'entità dell'impatto ambientale del sistema studiato rispetto a quello prodotto nell'area geografica prescelta come riferimento.

Secondo le norme ISO la fase di normalizzazione non è obbligatoria per una LCA completa.

6 - Valutazione: l'obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un indice finale, l'impatto ambientale associato al prodotto nell'arco del suo ciclo di vita.

I valori degli effetti normalizzati vengono perciò moltiplicati per i "fattori di peso" della valutazione, relativi alle varie categorie di danno, spesso riportati in guide tecniche, che esprimono l'importanza intesa come criticità, attribuita a ciascun problema ambientale.

Esistono diversi modelli di valutazione che possono essere così suddivisi:

- modelli di tipo Comprensivo: includono un elevato numero di parametri differenti, rinunciando spesso ad un'elevata precisione e alla quantificazione degli effetti.
- modelli di tipo Quantitativo: trattano i dati di impatto con grande precisione, limitandosi ad un numero circoscritto di parametri.

- modelli di tipo Pragmatico: si pongono come intermedi tra gli altri due, definendo con una certa precisione i parametri che consentono una corretta valutazione del prodotto, tenendo comunque conto dei relativi costi e dei tempi di esecuzione.

Alla base del calcolo di tali fattori vi è il principio della “distanza dallo scopo”: essa afferma che quanto più è grande il divario tra lo stato attuale e quello ideale cui si tende, tanto maggiore risulta la gravità di un effetto. È evidente quanto sia soggettivo tale giudizio, che può variare per aree geografiche, sensibilità e scuole di pensiero differenti. In alcuni casi si utilizzano fattori di peso tutti uguali tra loro, in alternativa si assumono quelli forniti da alcune banche dati.

Sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore adimensionale, l'indice ambientale finale, detto **ecoindicatore**, che quantifica l'impatto ambientale associato al prodotto.

La fase di valutazione d'impatto, a differenza della fase di inventario che ha raggiunto un buon grado di standardizzazione, è ancora caratterizzata da aspetti controversi che necessitano di ulteriori approfondimenti scientifici. Inoltre la soggettività legata alla scelta dei metodi di valutazione d'impatto difficilmente consentirà di raggiungere un consenso internazionale.

Ulteriori analisi aggiuntive di qualità dei dati della LCIA utili per meglio comprendere la significatività, l'incertezza e la sensibilità dei risultati possono essere:

- analisi di gravità, procedura statistica che identifica i dati aventi il maggiore contributo per il risultato dell'indicatore;
- analisi di incertezza, per determinare in che modo le incertezze nei dati e nelle ipotesi incidono sull'affidabilità dei risultati della LCIA;
- analisi della sensibilità, procedura per determinare in che modo le modifiche delle scelte metodologiche e dei dati incidono sui risultati dell'LCIA.

Un tentativo di rispondere alle esigenze di standardizzazione e di uniformazione dei contenuti degli studi di LCA è stato realizzato da ANPA (Agenzia nazionale protezione ambiente) nelle “Linee guida per la Dichiarazione Ambientale di Prodotto” (Agenzia nazionale per la protezione dell'Ambiente, 2001) in cui sono descritti i requisiti per l'esecuzione di tutte le fasi di una valutazione del ciclo di vita e sono identificate una serie di categorie d'impatto predeterminate.

1.3.1.3.4 Quarta fase di una LCA: interpretazione e miglioramento (ISO 14043)

All'interno di questa fase, attraverso un'analisi di sensibilità, sono interpretati e rappresentati i risultati delle fasi di inventario e di valutazione degli impatti, in modo da avere una percezione dello studio facilmente fruibile e comprensibile, in riferimento all'obiettivo dello studio. La fase di interpretazione del ciclo di vita comprende diversi elementi che sono:

- identificazione dei fattori significativi, in conformità con la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. Esempi di fattori significativi possono essere dati dell'inventario (energia, emissioni, rifiuti, ecc), categorie di impatto (per es. uso delle risorse, cambiamento climatico), contributi significativi nelle fasi del ciclo di vita (processi unitari individuali o i gruppi di processi);
- valutazione che comprende l'utilizzo delle tre seguenti tecniche: a) controllo di completezza (bisogna considerare tutte le informazioni rilevanti e in caso contrario fornire una giustificazione); b) controllo di sensibilità (valutare l'affidabilità dei risultati, stimando se e come l'incertezza dei dati si riflette sulle conclusioni); c) controllo di sensibilità (verificare la coerenza delle ipotesi, dei metodi e dei dati con l'obiettivo e il campo di applicazione);
- conclusioni, limitazioni e raccomandazioni. Questa fase andrebbe svolta in maniera interattiva con gli altri elementi della fase di interpretazione in modo da valutare e comunicare i fattori significativi, la metodologia e i risultati per i controlli di completezza, sensibilità e coerenza, trarre conclusioni preliminari e controllare che queste siano coerenti con l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio e nel caso di coerenza redigere un rapporto conclusivo.

La fase di interpretazione dei risultati è accompagnata quasi sempre dalla valutazione dei miglioramenti ed è la fase dell'LCA nella quale, dopo aver individuato gli ambiti più critici, vengono valutate e selezionate le opzioni e i miglioramenti per ridurre gli impatti ed i carichi ambientali dell'unità funzionale in studio di unità funzionali aventi la medesima funzione. Così, per esempio, può essere valutato l'impatto ambientale di un sistema di teleriscaldamento alimentato con tre diversi sistemi (gas naturale, elettricità, pellet) al fine di scegliere la fonte energetica a minor impatto ambientale (Ghafghazi et al, 2011).

Si possono, in questa sezione, rappresentare anche scenari diversi da quello considerato e confrontare così i risultati ottenuti. Così, ad esempio, si può confrontare l'impatto ambientale derivato dall'uso dei residui forestali per la produzione di carburanti o per la produzione di manufatti (Rivela et al., 2006).

Tale fase non ha ancora raggiunto un livello metodologico pari a quello delle precedenti, tuttavia rimane un momento importante poiché consente, ove possibile, un miglioramento dell'impatto ambientale in termini di diminuzione della richiesta d'energia, delle emissioni, dell'uso di risorse, ecc. È importante rilevare che l'LCA, come tutte le metodologie basate sul confronto, non propone una soluzione assoluta, ma identifica un insieme di alternative tra le quali poi, il decisore, sceglierà a suo giudizio la migliore.

La norma ISO definisce questa fase dell'LCA come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti. La norma inoltre richiama fortemente il fatto che solo una chiara e comprensibile, completa e consistente presentazione dei risultati delle fasi precedenti è in grado di fornire quelle indicazioni utili a impostare i possibili miglioramenti del sistema in esame.

1.3.1.4 La comunicazione dei risultati di uno studio LCA

Questa fase, parte integrante di uno studio LCA, consente di presentare i risultati e le conclusioni in una forma che sia adeguata al tipo di pubblico previsto. Se lo studio è completo e non si limita alla fase LCI ma si estende anche alla fase LCIA e viene presentato a terzi, il rapporto conclusivo dovrebbe comprendere:

- relazione con i risultati di LCI;
- la descrizione della qualità dei dati;
- le finalità delle categorie da proteggere;
- le categorie di impatto considerate;
- i modelli di caratterizzazione impiegati;
- i fattori ed i meccanismi ambientali;
- il profilo dei risultati degli indicatori.

1.3.2- LCA nella filiera legno-energia

Storicamente i modelli per gli studi di LCA sono nati e si sono sviluppati principalmente nel settore industriale (Hunt e Franklin, 1996; Boustead, 1996; Jensen e Postlethwaite, 2008) ma, da qualche decennio, l'interesse si è esteso anche nel settore alimentare ed agro- forestale, visto il ruolo che tale settore ha nelle emissioni di sostanze climalteranti e quello che può avere nella messa a punto di strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici.

Tra le strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici particolare attenzione è riservata, come abbiamo visto, alla promozione di filiere energetiche rinnovabili; tuttavia, poiché le fonti e le filiere possibili sono molteplici e sono anche esse impattanti, occorre tenere conto della vocazionalità energetica di un territorio e/o di un'azienda per individuare la soluzione più idonea in termini di impatti. Occorre quindi una valutazione della filiera energetica rinnovabile in termini di sostenibilità ambientale, mediante metodologia LCA, al fine di poterla o meno promuovere.

Nell'ambito delle agrienergie, in Toscana, la valorizzazione della filiera legno energia ha visto la promozione e la realizzazione di varie esperienze come possibilità concreta di diffondere forme di produzione di energie rinnovabili, come possibilità di diversificare le attività agricole e di creare nuove occasioni imprenditoriali; tale valorizzazione, tuttavia, non può prescindere da una valutazione del carico ambientale associato alla filiera stessa per poterne comprendere i vantaggi ed i limiti, in termini di impatti, ed adottare conseguentemente le necessarie strategie di miglioramento e/o cambiamento.

In letteratura la valutazione della sostenibilità ambientale di una filiera legno energia, con metodologia LCA, è abbastanza recente ed è caratterizzata da alcuni studi interessanti e specifici.

In particolare, ci sono studi che esplorano il carico ambientale di specie forestali a rapida crescita e la loro conversione energetica, in comparazione con sistemi energetici tradizionali che utilizzano combustili fossili. Nello specifico, uno studio (Roedl, 2010) condotto in Germania ha analizzato tutte le fasi della produzione di legno intensive per la produzione di energia termica ed energia elettrica, mediante la cogenerazione e la produzione di biodisel. I risultati ottenuti mostrano che i carichi ambientali di coltivazione e di raccolta di pioppo a rapido accrescimento sono bassi,

se si considera la biomassa prodotta nell'intero ciclo di vita. Lo sfruttamento dell'energia prodotta da questa biomassa provoca meno carichi ambientali rispetto alla produzione di energia da fonti fossili anche se ciò varia in funzione del combustibile fossile di riferimento. Così, ad esempio, rispetto alla produzione di energia da gas naturale, la filiera analizzata è favorevole in termini di formazione fotochimica di ozono e potenziale riscaldamento terrestre mentre è sfavorevole in termini di acidificazione e di eutrofizzazione. Infine, lo studio ha concluso che la produzione di biodiesel ha carichi inferiori rispetto a quelli del diesel fossile ad eccezione dell'eutrofizzazione.

In altri studi (Fantozzi e Buratti, 2010), condotti in Italia, sono stati valutati gli impatti delle varie fasi della filiera produzione legno, dalla coltivazione delle piante mediante short rotation, alla trasformazione in pellet e la successiva conversione in energia mediante una caldaia domestica da 22 kW. Sono stati utilizzati tre metodi (Ecoindicator99, EPS 2000, EDIP) diversi dello stesso programma SimaPro al fine di tenere conto dei danni ambientali, della rilevanza economica dei danni e delle categorie di impatto. L'analisi è stata condotta utilizzando dati della letteratura, dati rilevati direttamente e confrontando la filiera analizzata con quella di riferimento a gas naturale. L'analisi ha mostrato, sia con il metodo Ecoindicator99 che con EPS 2000, che i maggiori impatti sono legati alle operazioni agricole con maggiori danni sulla salute umana per il primo metodo utilizzato e sulla disponibilità delle risorse per il secondo. E' stato osservato che sul punteggio finale le infrastrutture incidono con un contributo modesto (2%), mentre il processo di produzione di pellet misurato incide in misura diversa dai dati riportati in letteratura (23% in meno). Con tutti e tre i metodi utilizzati risulta che gli impatti ambientali della filiera energetica rinnovabile sono notevolmente inferiori rispetto alla filiera a gas naturale (53% inferiori con il metodo Ecoindicator99, 30% più bassi con EPS 2000 e 62% con EDIP).

Altre analisi LCA sono state applicate a livello locale (Recchia e Cini, 2005), in un'azienda agricola del Chianti, per valutare in termini ambientali una filiera legno energia che utilizza sotto prodotti (forestali, vite, olivo) per la produzione di cippato e la conversione in energia termica, comparandola poi con una filiera di riferimento a GPL. I risultati della ricerca mostrano che la filiera rinnovabile ha impatti decisamente inferiori rispetto a quella di riferimento sia in termini di emissioni di CO_{2eq} sia di SO_{2eq}, NO_x, HCL e particolato, ad eccezione della fase della combustione; è stato

calcolato che la produzione di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ è pari a 22 kg/kWh nella filiera legno energia contro i 380 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ nella filiera a gas.

Alcuni studi LCA (Ghafghazi et al., 2011), realizzati in Canada, mettono a confronto fonti energetiche diverse (pellet, elettricità, gas naturale, energia geotermica) utilizzate in uno stesso distretto di teleriscaldamento per valutare gli impatti ambientali. E' stato dimostrato che nella filiera rinnovabile la produzione di $\text{CO}_{2\text{eq}}$ è stata di almeno 200 kg inferiore di quella a gas naturale; inoltre, è risultato che, nella filiera del pellet, le fasi che impattano maggiormente sono quella della produzione di pellet (50%) seguita dal trasporto (25%). La filiera del pellet è risultata più impattante sulla respirazione organica, sull'ecotossicità, sull'acidificazione terrestre e sull'eutrofizzazione; minori sono stati gli impatti in termini di riscaldamento globale, di riduzione di ozono e di esaurimento minerali.

Altre ricerche americane (Li Ma, 2011) hanno messo in relazione differenti tipi di combustibili (cippato, gas naturale e gasolio) per la produzione industriale di acqua calda ed hanno evidenziato, utilizzando il metodo Ecoindicator99, come la filiera ad energia rinnovabile sia decisamente meno impattante in termini di cambiamenti climatici rispetto alle altre due, mentre comporta maggiori impatti sulla salute umana; nell'ambito della filiera a cippato analizzata la fase maggiormente impattante è quella relativa all'abbattimento delle piante con processore, seguita dalla combustione e dal consumo di energia elettrica.

Negli Stati Uniti, nel Maine, è stata effettuata una LCA (Neupane e Halog, 2009) per valutare il carico ambientale della produzione industriale di biocarburanti di seconda generazione, con scenario di rigenerazione naturale ed artificiale delle piante forestali. I risultati dell'analisi LCA, con Ecoindicator99, hanno evidenziato che la fase maggiormente impattante è quella del trasporto seguita dall'abbattimento delle piante e dalla cippatura; gli impatti maggiori sono legati al consumo di combustibili fossili.

Nell'ambito forestale, anche a livello nazionale, ci sono alcuni studi che analizzano filiere per la produzione di biomassa ma non in termini di valutazione della loro sostenibilità ambientale bensì in termini di confronto (economico, di bilanci energetici, di produttività) fra diversi sistemi di meccanizzazione (Spinelli e Magagnotti, 2010) o diversi sistemi di esbosco (Picchio et al., 2009).

Uno studio LCA (Valente et al., 2011) è stato, invece, condotto in Val di Fiemme in Trentino per valutare l'impatto, in termini di potenziale riscaldamento terrestre

(GWP), di una filiera di approvvigionamento di biomassa legnosa per alimentare un impianto termico di teleriscaldamento a Cavalese mettendo a confronto un sistema di raccolta tradizionale ed uno innovativo con processore. I risultati dello studio mostrano, per il sistema innovativo, che per 1 m³ di biomassa legnosa con corteccia si producono circa 13 kg di CO_{2eq}, e che la fase della filiera che impatta maggiormente è la cippatura; dal confronto tra la filiera a cippato e quella a petrolio si è evidenziato una riduzione di 2,3 tonnellate di CO_{2eq} nella filiera rinnovabile, e di 1,7 tonnellate di CO_{2eq} quando si confronta con il gas naturale.

Da quanto detto emerge che in letteratura ci sono studi, sia internazionali che nazionali, sulla valutazione ambientale di filiere di cippato o pellet ottenuti con produzioni forestali dedicate mediante short rotation o di filiere che utilizzano sotto prodotti forestali o agricoli, mentre non sono molti gli studi che analizzano la filiera legno energia a partire da biomasse forestali naturali e locali (filiera corta) per utilizzazioni aziendali. In letteratura ci sono prevalentemente studi applicati ad aree industriali, comprensori, interi distretti energetici o sistemi di teleriscaldamento di vaste aree o paesi mentre meno diffusi sono gli studi su piccola scala, a livello locale o addirittura aziendale.

Lo studio oggetto della presenti tesi si distingue dalla letteratura descritta perché prende in esame la valutazione della sostenibilità ambientale di una filiera legno energia a partire dalla produzione di cippato da risorse forestali naturali e locali e la successiva conversione ed utilizzazione energetica all'interno di una tipica azienda agricola di un territorio montano.

2. Obiettivo della ricerca

La presente tesi si pone l'obiettivo di analizzare la sostenibilità ambientale di una filiera energetica a biomassa legnosa messa a punto in un'azienda agricola del Mugello, territorio situato nella parte settentrionale della Toscana che rappresenta, a livello nazionale, la regione con maggiore sviluppo di aree boschive (51,1%) (Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali, 2006).

Lo studio nasce dalla necessità di trovare soluzioni sostenibili per un'area come quella del Mugello, che ben si presta all'insediamento di distretti energetici basati sullo sviluppo di filiere corte legno-energia (Regione Toscana, 2008) e allo sviluppo di modelli di diversificazione e valorizzazione aziendale nell'utilizzo dell'energia prodotta, mediante sistemi tradizionali (teleriscaldamento e usi produttivi) e sistemi innovativi (microgenerazione, essiccazione dei foraggi).

Il Mugello, ed in particolare l'Alto Mugello a confine con l'Appennino Tosco-Romagnolo, rappresenta un'area rurale ricca dal punto di vista dell'offerta di biomasse ligno-cellulosiche, con una superficie forestale ad uso produttivo di circa 63.000 ettari (Guidi e Cesano, 2006), e un territorio montano caratterizzato da un tessuto imprenditoriale ricco di piccole e medie aziende agricole, delle quali circa il 47% a indirizzo zootecnico (Regione Toscana, 2004); si tratta di realtà attente a ottimizzare le risorse locali (filiera corta e locale) e a introdurre sistemi produttivi competitivi in termini di sostenibilità economica ed ambientale. Infatti, nel tessuto agro-forestale del Mugello, grazie anche alle politiche di sostegno verso sistemi produttivi di questo tipo, si sta diffondendo la consapevolezza del ruolo del settore nel mettere a punto strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici e l'esigenza di promuovere filiere rinnovabili che, nel rispetto della vocazione energetica territoriale, comportino minori impatti ambientali.

In questo contesto è nato lo studio oggetto della presente tesi che coinvolge due tipiche realtà produttive, una forestale e una zootecnica, e analizza una filiera legno-energia dalla produzione di cippato, a partire da legno di faggete locali, all'utilizzazione dell'energia derivante dalla sua combustione all'interno di un impianto termico aziendale. Questo ultimo rappresenta un sistema innovativo per la zona poiché alimenta una rete di teleriscaldamento di locali abitativi e produttivi, un

sistema di fornitura di acqua calda ad uso aziendale (lavaggi impianto di mungitura, abbeverate, ecc.), un essiccatore di foraggi e un prototipo microgenerativo.

Nello specifico lo studio, a partire da dati reali rilevati direttamente nelle due aziende, analizza la filiera energetica per valutarne la sostenibilità ambientale, delle diverse fasi e dell'intero processo, per poi compararla con quella di un analogo processo a combustibili fossili tradizionali; il confronto tra le due filiere consente di valutare la differenza degli impatti, di comprendere vantaggi e limiti della filiera rinnovabile e di adottare conseguentemente le necessarie strategie di miglioramento e/o cambiamento.

Successivamente, come obiettivo secondario, lo studio verifica l'impatto causato dall'introduzione di un aspetto innovativo sulla filiera energetica analizzata, ovvero l'uso di un processore nella fase di taglio delle piante. A tal fine, viene valutato il carico ambientale della produzione di un chilogrammo di cippato ottenuto con filiera tradizionale dell'Appennino Toscano e poi viene comparato con quello derivante dalla produzione della stessa quantità di cippato ottenuto con una filiera innovativa.

Infine, lo studio analizza la filiera tenendo conto anche degli impatti evitati con la microgenerazione prototipale e, sebbene siano preliminari, i risultati mostrano che tale parte della filiera consente di creare un sistema virtuoso in termini ambientali.

Per la valutazione della sostenibilità ambientale della filiera analizzata viene applicata la metodologia LCA (Life Cycle Assessment) o Analisi del Ciclo di Vita, quale procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali dell'intero ciclo produttivo standardizzato dalle normative europee. Per applicare la metodologia LCA è stato utilizzato il software SimaPro (7.3.3) uno dei programmi più diffusi a livello internazionale, poiché è flessibile, disponendo di vari parametri di modellazione, permette l'analisi interattiva dei risultati e dispone di una banca dati ampia e completa.

L'analisi è stata condotta utilizzando il metodo ReCiPe, evoluzione dell'Eco-indicator99, che consente di valutare, a livello medio, 18 categorie di impatto e a livello finale 3 categorie di danno (salute umana, qualità dell'ecosistema, risorse) e il metodo IPCC2007 per la valutazione del carico ambientale in termini di potenziale riscaldamento terrestre e quindi di cambiamenti climatici.

I risultati dell'analisi condotta nello studio possono essere utilizzati dagli operatori, privati e pubblici, del settore e del territorio per diffondere il modello in contesti simili e contribuire così al sostegno di sistemi produttivi sostenibili.

3. Materiali e metodi

3.1 – Il software utilizzato SIMAPRO 7.3.3

SimaPro è un codice di calcolo basato sul metodo LCA per la valutazione del ciclo di vita dei prodotti e processi in relazione al loro impatto ambientale. Prodotto da una società olandese (Prè Consultant) è uno dei software più diffusi, utilizzato da utenti di oltre 60 paesi del mondo,

3.1.1 Le banche dati

Il software SimaPro è comprensivo di varie banche dati per l'inventario che comprendono migliaia di processi e materiali. I database disponibili sono:

- Ecoinvent: banca dati di origine svizzera, copre quasi 4000 processi dei vari settori produttivi (energia, trasporti, materiali da costruzione, prodotti chimici, prodotti per il lavaggio, carta e cartone, agricoltura, trattamento degli inquinanti). Tutti i processi sono dotati di un'ampia documentazione, con collegata la descrizione dei dati (nome, unità di misura, derivazione del dato e sottocategoria di appartenenza) e le informazioni relative all'incertezza. Si distinguono, per diverso format, la banca dati "ecoinvent system processes" e la "ecoinvent system processes";
- US Input Output database: banca dati americana relativa a 481 settori connessi all'economia;
- Danish Input Output database: basato su dati statistici danesi;
- Buwal 250: banca dati svizzera sui materiali di imballaggio;
- Franklin USA 98: banca dati del Nord America relativa a materiali energia e trasporto;
- Dutch Input Output database: banca dati commissionata dal governo olandese che oltre a dati prettamente olandesi contiene anche dati relativi a produzioni in regioni dell'OCSE;
- LCA Food database: fornisce i dati ambientali relativi a processi connessi con le catene di produzione di prodotti alimentari in Danimarca;
- Methods: contiene una serie di metodi di valutazione di impatti;

- Industry data v.2.0: contiene dati forniti da associazioni del settore industriale;
- Idemat 2001: banca dati relativa alla produzione di materiali;
- ETH ESU: la banca dati ETH_ESU contiene dati di inventario rappresentativi della situazione svizzera e dell'Europa occidentale; è soprattutto concentrata sui sistemi energetici, dalla produzione dei vettori energetici, all'utilizzo, trasporto e smaltimento dei prodotti di scarto. In tale banca dati ci sono vari sottoinsiemi: vettori energetici (combustibili liquidi, gas, carbone, lignite, uranio, legno), produzione di energia elettrica (idroelettrica, nucleare, in impianti a carbone o combustibile), trasmissione di energia elettrica, produzione di materiali (rame, alluminio, plastica, acciaio, vetro, cemento, ghiaia), trasporto (su ruota, treno o nave), trattamento degli inquinanti (inceneritore, discariche, impianti di trattamento).

3.1.2 Metodi per la valutazione degli impatti

La valutazione degli impatti è un passo fondamentale per il corretto svolgimento di uno studio di LCA e il software SimaPro offre una vasta scelta di metodi da utilizzare, che per l'Europa, sono:

- Eco-indicator 95: il metodo sviluppato dagli olandesi ha normalizzazione basata sui livelli del 1990 per l'Europa e ponderazione fondata sulla distanza da livelli di target;
- Eco-indicator 99: tale metodo è derivato dall'aggiornamento e sviluppo del precedente; la normalizzazione e la ponderazione vengono eseguite a livello della categoria di danno (a livello di endpoint, secondo la terminologia dettata dall'ISO); le categorie di danno considerate sono tre (salute umana, qualità dell'ecosistema, risorse). Nella fase di valutazione del danno sono sommate nelle tre categorie di danno i dati pertinenti derivanti dalla caratterizzazione e relativi alle categorie di impatto considerate;
- CML method (1992): uno dei primi metodi resi disponibili dai Paesi Bassi;
- CML 2 method (2001): rispetto al precedente ha un approccio a livello di midpoint (es. acidificazione, cambiamenti climatici ecc.) e fornisce una lista di categorie di valutazione dell'impatto (categorie di impatto obbligatorie, categorie di impatto addizionali e altre categorie);

- EDIP/UMIP: sviluppato in Danimarca nel 1996 include le fasi di caratterizzazione, normalizzazione e pesatura. L'ultima versione è del 2003 ed include 18 categorie di impatto;
- EPS 2000: il sistema EPS (Environmental Priority Strategies) è uno strumento per il processo di sviluppo di un prodotto ed è un aggiornamento della versione del 1996; ha cinque categorie di impatto (salute umana, capacità di produzione dell'ecosistema, riserva di risorse abiotiche, mantenimento della biodiversità, mantenimento dei valori culturali), permette la caratterizzazione e la valutazione dei danni;
- EPD 2008: usato principalmente per le dichiarazioni ambientali di prodotto, ha sei categorie di impatto (composti ad elevati potenziali di riscaldamento, gas ad effetto serra, gas nocivi allo strato di ozono, composti acidificanti, gas che comportano creazione di ozono fotochimico, composti eutrofizzanti);
- IMPACT 2002+: modello sviluppato in Svizzera presenta un approccio sia a livello di midpoint (14 categorie di impatto) che endpoint (4 categorie di danno); include le fasi di caratterizzazione, valutazione del danno, normalizzazione e valutazione finale;
- Ecological Scarcity 2006: è la versione aggiornata del 1997 e raggruppa in sette categorie di impatto specifici, permette le fasi di caratterizzazione e di pesatura;
- ReCiPe Endpoint e Midpoint: è il successore dell'Ecoindicator 99 e del CML per integrare l'approccio orientato al danno del primo con l'approccio orientato al problema del secondo. In effetti, l'approccio dell'Ecoindicator consente di esprimere i risultati in tre sole categorie di impatti rendendo più facile l'elaborazione delle conclusioni ma rendendo l'incertezza dei risultati superiore; con l'approccio CML sono definite le categorie di impatto a livello medio per cui l'incertezza è bassa ma la formulazione delle conclusioni è più complessa a causa delle numerose categorie di impatto. ReCiPe implementa entrambe le strategie con possibilità di valutazione sia a livello medio, con 18 categorie di impatto, sia a livello finale con 3 categorie di danno (salute umana, qualità dell'ecosistema, risorse).

Il software SimaPro offre la possibilità di utilizzare metodi specifici per analizzare un determinato problema, quali ad esempio:

- IPCC 2007: è stato sviluppato dal Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici e contiene i fattori di cambiamento climatico IPCC con un orizzonte temporale di 100, 20 e 500 anni. Il metodo non considera la formazione indiretta di monossido di azoto da emissioni di azoto, l'incremento radioattivo dovuto alle emissioni di ossidi di azoto, acqua e solfato ecc. nella bassa stratosfera e troposfera superiore e non tiene conto degli effetti indiretti delle emissioni di CO. Il metodo non prevede la normalizzazione e la ponderazione dei dati;
- Ecological footprint: l'impronta ecologica è definita come la somma di terra biologicamente produttiva ed acqua che una popolazione richiede per produrre le risorse che consuma e per assorbire una parte dei rifiuti generati dal consumo di combustibili fossili e nucleari. Nel contesto LCA, l'impatto ecologico di un prodotto è definito dalla somma di occupazione terrestre diretta e indiretta e dalle emissioni di CO₂ derivate dal consumo di energia fossile ed energia nucleare. Il metodo non prevede la normalizzazione dei dati ma la sola ponderazione;
- Cumulative Energy Demand: è un metodo per il calcolo della domanda di energia cumulativa; non è prevista la normalizzazione ma la ponderazione .

Lo schema di calcolo utilizzato dai vari metodi è un modello a blocchi (figura 9).

Nella figura 9 i vari blocchi sono stati rappresentati con colori diversi: il rosso, per individuare i blocchi impiegati per la raccolta dei dati e riservati al prodotto e a ciascuno dei suoi componenti, il blu per i blocchi relativi ai dati contenuti nel database e il verde per i blocchi inerenti il calcolo e la valutazione.

Nel momento in cui ci si appresta a realizzare l'LCA di un qualsiasi prodotto è necessario poter disporre di informazioni dettagliate riguardo a ciascuno dei suoi componenti, come i materiali di cui sono realizzati e il loro peso, i processi di lavorazione, i trasporti e l'energia che, nei diversi momenti della produzione, concorrono alla realizzazione del prodotto analizzato.

L'LCA è un metodo di indagine iterativo che permette di compiere valutazioni anche solo parziali e di poter completare l'inserimento dei dati in qualsiasi momento; anche il SimaPro possiede questa caratteristica, di conseguenza i confini dello studio possono essere modificati in funzione degli obiettivi di studio o qualora si abbiano a disposizione ulteriori informazioni.

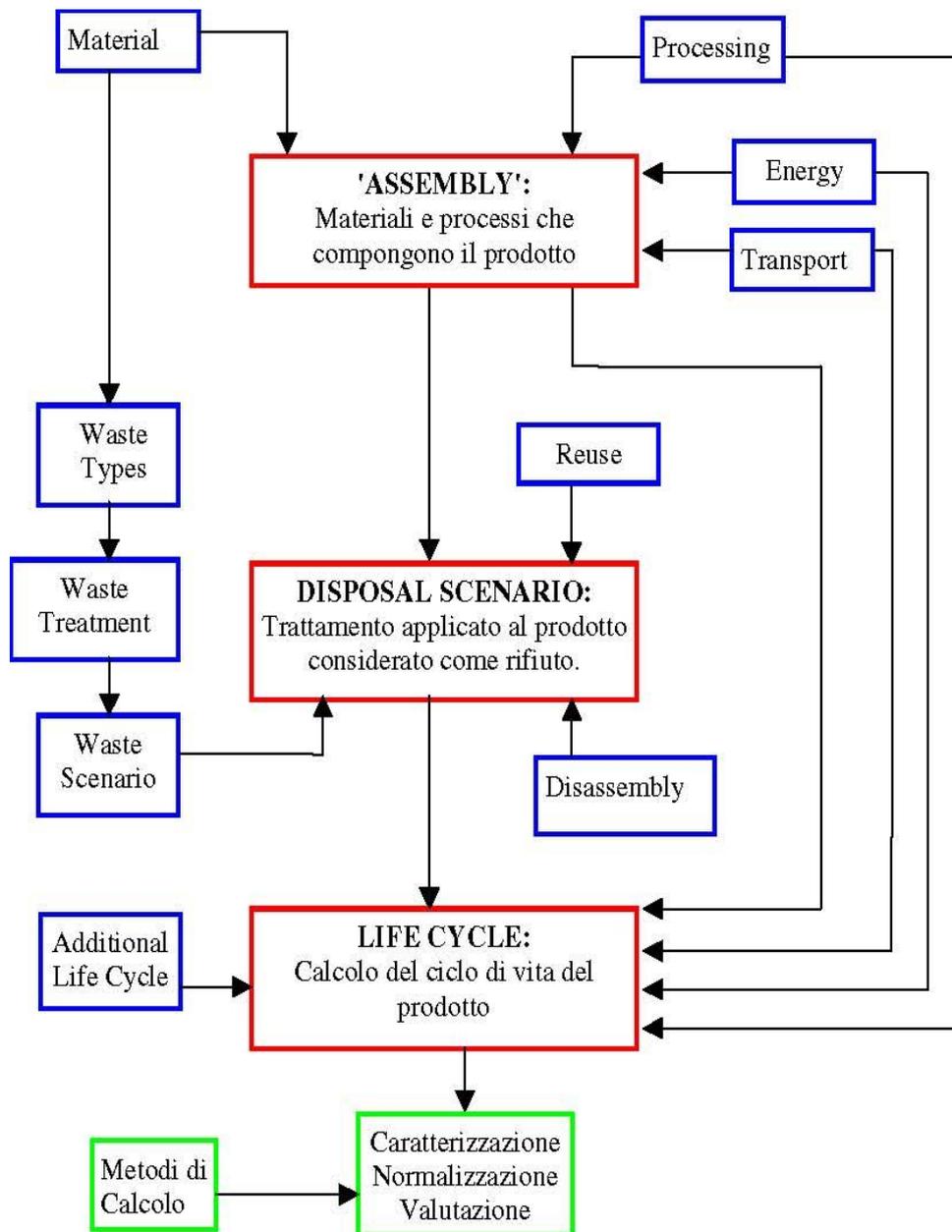


Fig. 9 Schema di processo del programma Sima Pro 7.3.3

Per ogni componente del prodotto in esame è necessario creare un *'Assembly'* in cui vengono assemblate le diverse fasi create e in cui concorrono i dati relativi ai materiali, alle lavorazioni, all'energia impiegata e ai trasporti, un *'Disposal Scenario'* in cui si realizza lo scenario dei residui del processo scegliendo il loro tipo di smaltimento e un *'Life Cycle'* in cui sono presi in considerazione tutti gli aspetti legati all'utilizzo di un prodotto o del componente. I dati utilizzati sono organizzati in

materiali, processi, trasporti, energia ed appartengono al database del metodo scelto che può essere implementato o modificato a seconda dell'esigenza dell'utente.

3.1.3 Impatti e danni valutati

L'analisi LCA per la valutazione degli impatti e dei danni ambientali della filiera legno-energia oggetto di studio è stata svolta utilizzando, nell'ambito del programma SimaPro 7.3.3, due metodi: ReCiPe e IPCC 2007. La scelta di questi due metodi è stata fatta sia perché rappresentano la metodologia più recente per la valutazione ambientale di un processo, come nel caso del ReCiPe, sia per la loro particolare attenzione agli indicatori delle emissioni climalteranti, come nel caso del IPCC 2007.

Il metodo ReCiPe è l'evoluzione dell'Ecoindicator 99 e del CML ed ha lo scopo di coniugare i vantaggi di entrambi ovvero l'approccio orientato al danno del primo con l'approccio orientato al problema del secondo. In effetti, il metodo Ecoindicator consente di esprimere i risultati in tre sole categorie di impatti rendendo più facile l'elaborazione di conclusioni ma rendendo l'incertezza dei risultati superiore; con l'approccio CML sono definite le categorie di impatto a livello medio per cui l'incertezza è bassa ma la formulazione delle conclusioni più complessa a causa delle numerose categorie di impatto. Il metodo ReCiPe implementa entrambe le strategie con possibilità di valutare a livello medio 18 categorie di impatto (midpoint) e a livello finale 3 categorie di danno: salute umana, qualità dell'ecosistema, risorse (endpoint).

Nell'ambito del metodo ReCiPe è stata utilizzata la versione "individualista"(I) con normalizzazione europea e ponderazione media (versione I/A).

Poiché lo studio pone particolare interesse all'impatto della filiera in termini di cambiamenti climatici è stato scelto il metodo IPCC 2007 che ha come unico indicatore ambientale il potenziale di riscaldamento dell'atmosfera (GWP) in un orizzonte temporale di 100 anni.

3.1.3.1 Metodo ReCiPe

Quando si applicano gli eco-indicatori ad una LCA bisogna tenere presente che tutte le emissioni (aria, acqua e suolo) e tutte le forme di sfruttamento del territorio sono valutate con riferimento all'Europa, con le seguenti eccezioni e restrizioni:

- il danno della riduzione dello strato di ozono e l'effetto serra sono valutati su scala globale;
- il danno dovuto ad alcune sostanze radioattive è valutato su scala globale;
- il danno dovuto all'esaurimento delle risorse è valutato su scala globale;
- il danno dovuto ad alcune persistenti sostanze cancerogene è definito considerando anche le regioni geografiche contigue all'Europa.

I risultati ottenuti devono essere inoltre visti come marginali, nel senso che riflettono l'incremento del danno che si aggiunge ad un livello di danno corrente già presente.

3.1.3.1.1 Categorie di impatti

Le categorie di impatti, a livello di midpoint, considerate con il metodo ReCiPe (I) sono state 18 (figura 10):

- **Riduzione dell'ozono.**

Il fattore di caratterizzazione della riduzione dell'ozono rappresenta la distruzione dello strato di ozono stratosferico dovuto alle emissioni antropiche. L'unità di misura è kg/anno CFC-11 equivalenti.

- **Tossicità umana ed ecotossicità (terrestre, acqua dolce e marina)**

Il fattore di caratterizzazione della tossicità umana ed ecotossicità è dato dalla somma della persistenza ambientale, dell'accumulo nella catena alimentare umana e della tossicità di una sostanza chimica. L'unità di misura è kg/anno 1,4-dichlorobenzene (14DCB).

- **Radiazione ionizzante**

Il fattore di caratterizzazione è dato dalle radiazioni ionizzanti per il livello di esposizione. L'unità è kg/anno Uranio 235 equivalenti.

- **Formazione fotochimica di ossidanti**

Il fattore di caratterizzazione di formazione di ossidanti fotochimici è definita come la variazione marginale in 24 ore della concentrazione media europea di ozono (CO_3 in kg/m^3) a causa di una variazione marginale di emissione di sostanza x (dMx in kg/anno). L'unità è kg/anno NMVOC.

- **Formazione particolato**

Il fattore di caratterizzazione della formazione del particolato è la quantità immessa di PM10. L'unità è kg/anno di PM₁₀ equivalenti.

- **Cambiamenti climatici (salute umana e qualità dell'ecosistema)**

Il fattore di caratterizzazione del cambiamento climatico è il potenziale di riscaldamento globale. L'unità è kg/anno CO₂ equivalenti.

- **Occupazione agricola e urbana del suolo**

La quantità di terreni agricoli sia o suolo urbano occupato per un certo tempo. L'unità è anno * m².

- **Trasformazione di terreno naturale**

La quantità di terreno naturale trasformato e occupato per un certo tempo. L'unità è anno * m².

- **Eutrofizzazione marina**

Il fattore di caratterizzazione dell'eutrofizzazione marina è data dalla persistenza ambientale dell'emissione di sostanze nutrienti contenenti N. L'unità è kg/anno N_{equivalenti} in acqua marina.

- **Eutrofizzazione d'acqua dolce**

Il fattore di caratterizzazione dell'eutrofizzazione di acqua dolce è data dalla persistenza ambientale dell'emissione di sostanze nutrienti contenenti P. L'unità è kg/anno P equivalenti d'acqua dolce.

- **Combustibili fossili**

Il fattore di caratterizzazione della riduzione fossile è dato dalla somma della quantità di combustibile fossile estratto, basata sul potere calorifico superiore. L'unità è MJ.

- **Esaurimento minerali**

Il fattore di caratterizzazione per esaurimento minerali è la diminuzione percentuale. L'unità è di kg di ferro (Fe) equivalenti.

- **Esaurimento d'acqua dolce**

Il fattore per l'esaurimento acqua dolce è la quantità di consumo di acqua fresca. L'unità è m³.

Acidificazione terrestre

Il fattore di caratterizzazione dell'acidificazione terrestre è data dalla persistenza ambientale dell'emissione di sostanze nutrienti contenenti S. L'unità è kg/anno S_{eq.} nel suolo.

Le categorie di impatto “endpoint” considerate sono state raggruppate, durante la fase di caratterizzazione, in tre sole categorie di danni:

1. *Human Health* (Salute umana)
2. *Ecoystem Quality* (Qualità dell’ecosistema)
3. *Resources* (Sfruttamento delle risorse)

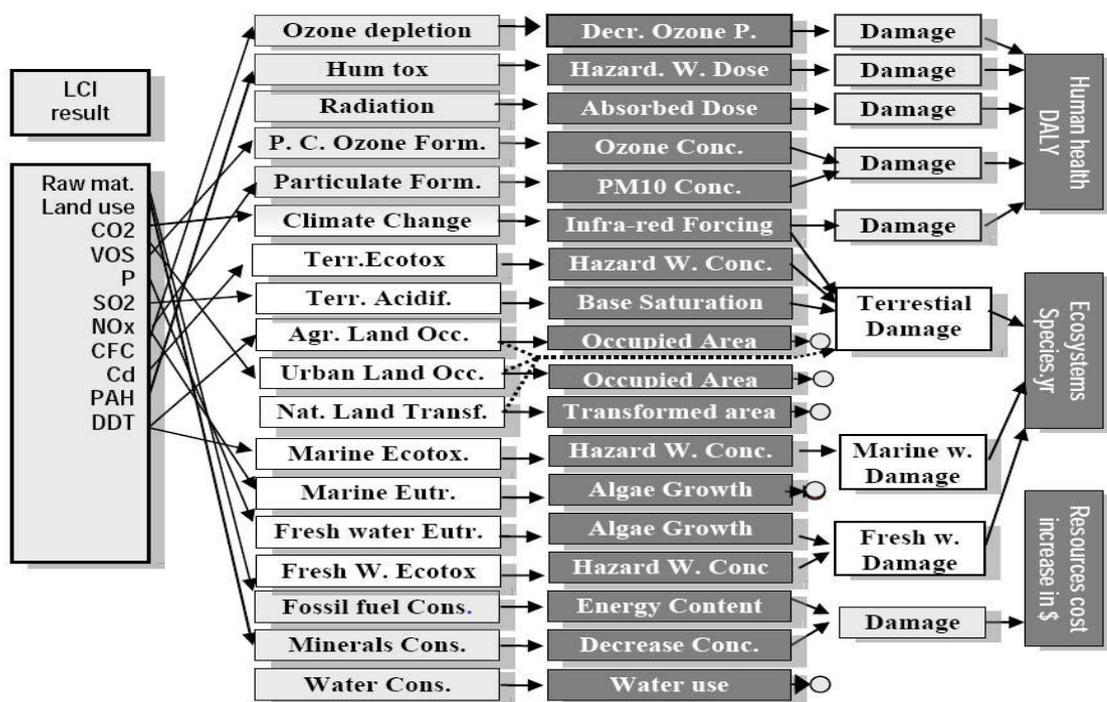


Fig. 10 Schema degli impatti ambientali

3.1.3.1.2 Il danno alla salute umana

Sono stati considerati gli effetti sulla salute umana dovuti all'emissione di sostanze nell'aria, nell'acqua e nel suolo; il danno viene espresso in DALY (Disability Adjusted Life Year) che misura il peso di un'infermità dovuta ad un'invalidità o a una morte prematura attribuibili a ciascuna malattia distinguendo gli anni trascorsi da ammalato da quelli persi per morte prematura (indice internazionale utilizzato anche dalla Banca mondiale e dall'Organizzazione mondiale della sanità).

Nella metodologia ReCiPe vengono considerati per la categoria “Salute umana” i seguenti danni causati:

- ✓ dai cambiamenti climatici
- ✓ dalla riduzione di ozono
- ✓ dalla tossicità per l'uomo
- ✓ dalla formazione di ossidanti fotochimici
- ✓ dalla formazione di particolato
- ✓ dalle radiazioni ionizzanti

Il calcolo del danno si sviluppa in tre passi distinti:

- *Fate analysis*: dall'emissione alla concentrazione (il risultato dell'analisi è un *Fate factor*, che costituisce un legame tra una emissione in Europa [kg/anno] ed una concentrazione costante riscontrabile in aria, acqua potabile o cibo, come conseguenza dell'emissione;
- *Effect analysis*: dalla concentrazione ai casi di malati per kg di emissione (è una stima della probabilità che un individuo medio sviluppi una malattia se esposto, durante la sua vita che si assume di 70 anni), ad un inquinamento dovuto ad una concentrazione nell'ambiente di un microgrammo di sostanza per metro cubo;
- *Damage analysis*: dai casi di malati ai DALYs per kg di emissione (la fase finale lega gli effetti delle emissioni alla salute umana, mettendo in relazione la malattia al numero di anni vissuti dall'uomo in malattia (YLD) e al numero di anni di vita persi (YLL). La somma dei due tempi (YLD e YLL) rappresenta, perciò, il numero di DALY, ovvero la misura del danno alla salute umana causato dall'esposizione ad un determinato agente.

3.1.3.1.3 Il danno alla qualità dell'ecosistema

La misura del danno su un ecosistema tiene conto della diminuzione relativa del numero di specie (espressa sotto forma di frazione) in una determinata area e in un determinato periodo.

Per esprimere l'effetto dei vari impatti considerati su un gruppo di specie si utilizzano due espressioni: la Frazione Potenzialmente Estinta (PAF) e la Frazione Potenzialmente affetta da Danno (PDF); le differenze tra PAF e PDF non ci permettono di esprimere il valore del danno inferto alla qualità dell'ecosistema mediante una semplice somma dei due valori. L'unità di misura utilizzata è specie per anno.

Nella metodologia ReCiPe vengono considerati per la categoria “Qualità dell’ecosistema” i seguenti danni all’ecosistema causati:

- ✓ dai cambiamenti climatici
- ✓ dall’acidificazione terrestre
- ✓ dall’eutrofizzazione dell’acqua dolce
- ✓ dall’ecotossicità terrestre
- ✓ dall’ecotossicità dell’acqua dolce
- ✓ dall’ecotossicità dell’acqua marina
- ✓ dall’occupazione di terreno agricolo
- ✓ dall’occupazione di terreno urbano
- ✓ dalla trasformazione del terreno naturale

3.1.3.1.4 L’esaurimento delle risorse

Il metodo proposto è basato sul principio che se la qualità di una risorsa si riduce cresce lo sforzo per l’estrazione della risorsa rimanente. Ciò significa che, per ogni kg di risorsa utilizzata, decresce la qualità delle risorse rimanenti e, dunque, aumenta lo sforzo necessario alle successive estrazioni. Il decremento della qualità di una risorsa ed il corrispettivo incremento dello sforzo futuro necessario all’estrazione sono i parametri utilizzati per la valutazione del danno alle risorse, espresso attraverso il concetto di surplus costi (\$). Nella metodologia ReCiPe vengono considerati per la categoria “Sfruttamento delle risorse” i seguenti danni all’ecosistema causati:

- ✓ esaurimento dei minerali
- ✓ esaurimento dei combustibili fossili

3.1.3.1.5 La stima del danno

Il calcolo del punteggio totale per le tre categorie di danno conclude la struttura del modello di valutazione. Per ottenere la stima del danno sono ancora necessarie due fasi: la normalizzazione, che rende le diverse categorie di danno confrontabili fra di loro, e la valutazione, che attribuisce ai valori ottenuti dalla fase precedente i pesi relativi alla prospettiva prescelta.

Per la valutazione del danno occorre confrontare fra di loro i valori ottenuti per le tre categorie; poiché essi sono caratterizzati da tre differenti unità di misura (DALY, specie per anno, \$ surplus) si rende necessaria la fase di normalizzazione, nella quale i risultati ottenuti saranno rapportati ad un medesimo valore di riferimento. Il valore di riferimento può essere scelto con modalità differenti, ma, solitamente, esso

rappresenta la somma di tutte le emissioni e le estrazioni di risorse riferita ad un certo territorio, in un dato periodo di tempo.

Per risolvere il problema del livello di scientificità richiesto dallo studio del LCA e quindi del livello di soggettività ammesso, il ReCiPe segue il modello della “Cultural Theory” proposto da Thompson nel 1990 e raggruppa le diverse fonti di incertezza e delle varie scelte in un numero limitato di vista o prospettive.

Le tre prospettive sono:

- Individualista (I): è basata su interessi a breve termine, impatti sicuri e visione ottimistica alla capacità di adattamento dell’uomo allo sviluppo tecnologico;
- Gerarchica (H): si basa sui principi di politica più comuni, medi, per quanto riguarda la struttura e le principali problematiche;
- Egualitaria (E): tiene conto del lungo periodo di tempo e, pertanto, è la più prudente; considera anche gli impatti non del tutto definiti ma per i quali ci sono indicazioni.

La tabella 2 riporta, in percentuale, i fattori peso attribuiti nella fase di valutazione alle tre categorie di danno secondo le tre diverse prospettive culturali: gerarchica (prospettiva di lungo termine), egualitaria (prospettiva di medio termine), individualista (prospettiva di breve termine).

Tab.2 Fattori peso attribuiti alle tre categorie di danno secondo le tre prospettive culturali

PROSPETTIVA	Salute umana (%)	Qualità dell’ecosistema (%)	Risorse (%)
Gerarchica	40	40	20
Ugualitaria	30	50	20
Individualista	55	25	20

3.1.3.2 Metodo IPCC 2007

Il cambiamento climatico, legato alle emissioni di gas ad effetto serra in atmosfera, può avere effetti negativi sulla salute degli ecosistemi, sulla salute umana e sul benessere degli animali. Il modello per la valutazione dei cambiamenti climatici è stato elaborato da esperti del Gruppo Intergovernativo (IPCC). I fattori di caratterizzazione sono espressi come Global Warming Potential (GWP) per un

orizzonte temporale di 100 anni espresso in termini di incremento di CO₂equivalenti. L'ambito geografico di questo indicatore è su scala globale.

3.2 – Il Caso studio: applicazione della LCA a una filiera legno-energia

Nel presente studio la metodologia LCA, secondo le norme UNI EN 14010:2006 e UNI EN ISO 14044:2006, è stata applicata a una filiera legno-energia e ad adeguata filiera di riferimento per analizzarne la sostenibilità ambientale.

Successivamente, è stato valutato, in termini di impatti ambientali, come l'introduzione di un sistema innovativo nella produzione di cippato influisca sulla filiera energetica analizzata.

E' stata individuata un'area di studio comprensiva di una parte forestale, in cui si sviluppa la produzione di cippato a partire da biomasse locali, e di un'azienda agricola che utilizza il cippato per la produzione di energia, termica ed elettrica.

E' stata fatta l'analisi della LCA secondo le quattro fasi principali:

- definizione degli obiettivi e dei confini di sistema,
- raccolta dati,
- valutazione dell'impatto ambientale,
- interpretazione dei risultati e miglioramento.

3.2.1 Descrizione aree di studio

3.2.1.1 Descrizione area di studio forestale

Il caso studio è localizzato in una foresta privata di Firenzuola, provincia di Firenze (figura 11) nell'Appennino Tosco-Romagnolo all'interno di un'oasi, Oasi di Covigliaio, e di un sito SiC (Sito di importanza comunitaria) che si estende tra due Passi Appenninici, della Futa e della Raticosa.

L'area si trova a circa 850-1000 metri s.l.m, all'interno di un paesaggio a morfologia collinare-montano, in cui si stagliano sia blocchi ofiolitici di varia composizione (Sasso di Castro), che arenacei marnosi ed arenacei fini.

Il clima è mite, con estati umide. Le precipitazioni annuali sono mediamente di 850 mm, le temperature medie della zona del mese più freddo, gennaio, sono di + 1,4°C e

la temperatura media del mese più caldo, luglio, di + 19,9 °C (stazione meteorologica Firenzuola).



Fig. 11 Foresta Oasi di Covigliaio

La zona è caratterizzata da una superficie boschiva di circa il 65%, (APAT, 2003) con prevalenza di latifoglie (91%) rispetto alle conifere (9%). La viabilità forestale è buona.

Il contesto socio economico è tipico di un'area montana con attività produttive legate al territorio (agricoltura, attività forestali, attività di estrazione della pietra serena) e con l'esigenza di consolidare e sviluppare settori in crisi, come quelli forestali, malgrado la ricchezza delle superficie boschive presenti, per consentire il permanere della popolazione e, quindi, il controllo del territorio.

In questo contesto opera il Consorzio Forestale Mugello. Si tratta di un Consorzio di recente costituzione che agisce per lo svolgimento di fasi di produzione agro-silvo-forestale e per la gestione delle risorse ambientali rientranti nella competenza delle rispettive proprietà e imprese. In particolare, il Consorzio opera nell'ambito della filiera legno- cippato-energia delle risorse forestali locali. Nell'ambito delle attività e delle proprietà del Consorzio si è sviluppata l'attività di ricerca.

Nell'area oggetto di studio i boschi a faggete (figura 12) rappresentano una risorsa insostituibile e una loro corretta gestione significa mantenere inalterato il loro valore e la loro produttività nel tempo, con ricadute positive sulla comunità locale, sia a livello ambientale che economico. Nella zona, però, i diradamenti delle fustaie non vengono spesso più effettuati a causa dei costi eccessivi a scapito del buon governo della

fustaia e della qualità del prodotto finale. Gli imprenditori forestali sentono perciò l'esigenza di reintrodurre questa operazione colturale, sostenibile ormai solo con l'introduzione della meccanizzazione a sostegno della lavorazione tradizionale. E' stata così sperimentata una filiera innovativa con l'uso di un processore nella fase di taglio.



Fig.12 Faggete località Covigliaio (FI) prima del diradamento

E' stato utilizzato un processore Kesla 25 SH (figura 13), della serie Stroke Harvester, montato su escavatore Caterpillar Fiatallie Simit 18 di 180 quintali caratterizzato da una prolunga idraulica (X tender) per incrementare il raggio di lavoro dell'escavatore, dall'avanzamento ciclico del martinetto in modo da operare anche su tronchi curvi senza danneggiare la corteccia, da valve a coltello per evitare lo scivolamento sul tronco bagnato durante la sramatura, da notevole apertura delle valve per movimentare i tronchi tagliati/sramati.



Fig. 13 Processore Kesla montato su escavatore, in fase di abbattimento

3.2.1.2 Descrizione area di studio zootecnica

L'Azienda Agricola "Riccianico", in cui si trova l'impianto termico a cippato oggetto di studio, è locata nel paese di Firenzuola, poco distante dal cantiere forestale di produzione del cippato.



Fig. 14 Stalla dell'azienda agricola Riccianico

E' un'azienda di tipo agro-zootecnico con allevamento di 180 bovine, di razza bruna, di cui la metà circa sono vacche in lattazione mentre le rimanenti sono in asciutta e capi allevati per la rimonta interna, vitelline, manze (figura 14).

La produzione annua della stalla è di 8000/9000 quintali di latte, mediamente 25 litri al giorno per ciascun capo in lattazione, che vengono conferiti alla Centrale del Latte di Firenze (Mukki Latte). Il prodotto è distribuito a livello commerciale con l'etichettatura "Latte Selezione Mugello". Per motivi di strategia aziendale, oltre che di dispendio energetico, alla stalla non sono affiancati ambienti o macchinari destinati allo stoccaggio del latte o alla sua trasformazione in latticini. Sono presenti solamente i sistemi di refrigerazione e di conservazione del latte appena munto.

L'azienda coltiva circa 140 ettari di terreno collinare a seminativo (prati polifiti, foraggere, farro) secondo metodi di agricoltura biologica; i prodotti aziendali sono destinati, per la maggior parte, all'alimentazione del bestiame. Per migliorare la tecnica della fienagione e la qualità del foraggio, in termini nutritivi e sanitari, è stato recentemente realizzato un impianto di essiccazione del fieno.

In questo modo è possibile imballare il foraggio anche in condizioni meteorologiche non favorevoli per l'essiccazione in campo, anticipando di circa 15 giorni il primo taglio primaverile (15-30 maggio per circa 4/5 della produzione annua) e valorizzando il raccolto di fine estate (10-20 settembre per circa 1/5 della produzione annua).

L'essiccatore ha una capacità di lavorazione di otto rotoballe per ogni turno di essiccazione e, con una potenza termica di targa di 110 kW termici, necessita mediamente di sette ore di funzionamento per portare l'essiccazione ai livelli di bassa umidità richiesti ai fini dell'alimentazione animale ottimale (figura 15).



Fig. 15 Impianto per l'essiccazione dei foraggi

L'aria calda utilizzata per l'essiccatore del foraggio viene fornita da una batteria di scambio termico alimentata con un circuito ad acqua calda proveniente da una caldaia automatica a cippato.

La caldaia, con potenza termica nominale di 150 kW ed efficienza di combustione del 90%, è uno dei modelli più avanzati in termini di tecnologia di combustione. Nello specifico la caldaia installata è a griglia a gradini, mobile e raffreddata ad aria nella camera di combustione; l'aria per la combustione (aria primaria) viene condotta al combustibile sotto la griglia favorendo sia un buon raffreddamento dei componenti della griglia sia un preriscaldamento dell'aria comburente che agisce positivamente sulla combustione. Il sistema di regolazione della combustione rileva la quantità di aria (aria secondaria) necessaria per un determinato stato di funzionamento attraverso

una sonda lambda e, di conseguenza, ottimizza la combustione. La quantità ottimale di combustibile è dosata attraverso la temperatura del gas caldo. Le polveri vengono separate mediante un separatore a tre cicloni, che si trovano all'interno del polverizzatore. I gas di scarico vanno in rotazione e con la forza centrifugale i componenti pesanti, come particelle di carbone o di polvere che si trovano nei gas di scarico, vengono scaricati in apposito contenitore.

La caldaia è alimentata automaticamente mediante un sistema di estrazione ad albero tubolare del cippato raccolto in apposito deposito.

Da un punto di vista strutturale, l'impianto termico che è stato realizzato nell'azienda Riccianico, si compone di un locale per il deposito del cippato e un locale in cui è stata installata la caldaia.

Il deposito del cippato è stato realizzato in vano semi-interrato, per agevolare lo scarico del cippato dal rimorchio del trattore, sotto tettoia ed ha un volume di circa 50 m³; è fornito di pavimentazione inclinata in legno e di coclea di carico con estrattore.

Nel locale adiacente è installata la caldaia, un serbatoio di accumulo termico coibentato (denominato Puffer) avente capacità di 4.000 litri di acqua calda e le tubazioni di collegamento ai collettori di mandata e ritorno dai quali hanno origine le linee di alimentazione.

In effetti, la caldaia alimenta, oltre all'essiccatore, anche una rete aziendale di teleriscaldamento per usi abitativi e produttivi ed un microgeneratore.

Il Microgeneratore è un impianto prototipale (figura 16) basato su ciclo rankine a fluido organico (ORC), utilizzando un sistema alternativo a pistoni per la conversione dell'energia termica in corrente elettrica continua e un inverter per la conversione della corrente continua in corrente alternata con la conseguente possibilità di funzionare in parallelo alla rete elettrica. Ha una potenza elettrica di 3,02 kW, una potenza termica richiesta all'evaporatore pari a 30 kW termici, potenza termica restituibile al condensatore di 27 kW termici. La temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore è di 85 °C mentre quella dell'acqua in uscita dal condensatore può variare fra 15 e 35°C.

L'energia termica recuperata al condensatore del microgeneratore sotto forma di acqua calda a 35°C viene utilizzata nel ciclo produttivo dell'azienda (lavaggi stalla ed abbeverate).



Fig 16 Sistema ORC per microgenerazione termo elettrica

Per quanto riguarda l'energia elettrica, l'impianto di microgenerazione funziona in parallelo alla rete dell'ENEL e l'energia elettrica prodotta viene autoconsumata dall'azienda agricola con la modalità definita "scambio sul posto" e quindi va a costituire un risparmio economico sulla bolletta elettrica dell'azienda.

Riassumendo, l'impianto termico (figura 17) è composto dalle seguenti parti:

1. Deposito cippato con coclea di carico ed estrattore a bracci rotanti
2. Caldaia a cippato (figura 18)
3. Rete di teleriscaldamento con accumuli termici locali
4. Essiccatore di rotoballe con batteria di scambio termico ad acqua calda
5. Microgeneratore
6. Connessione alla rete elettrica



Figg. 17 e 18 Rispettivamente: impianto termico e caldaia da 150 kW

3.2.2 Definizione degli scopi, degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio LCA

3.2.2.1 Scopi ed obiettivi dello studio

Lo scopo di questo studio è di analizzare in termini di sostenibilità ambientale un nuovo modello di filiera energetica del settore agro-forestale del territorio del Mugello per favorirne la promozione, mediante diffusione dei risultati ottenuti, agli operatori del settore e al territorio e contribuire così al sostegno di sistemi produttivi sostenibili.

Nello specifico, l'obiettivo principale del presente studio è stato:

- analizzare una tipica filiera legno-energia, nelle sue diverse fasi, per verificarne la sostenibilità energetico-ambientale.

Successivamente, come obiettivo secondario, è stato verificato l'impatto causato dall'introduzione di un aspetto innovativo sulla filiera energetica analizzata, ovvero l'uso di un processore nella fase di taglio delle piante.

Per conseguire entrambi gli obiettivi dello studio è stato necessario determinare:

- il carico ambientale della produzione di un megajoule (MJ) ottenuto in impianto termico aziendale alimentato a cippato e di compararlo con il carico ambientale della stessa produzione di energia ottenuta con combustibile fossile tradizionale.
- il carico ambientale della produzione di un chilogrammo (kg) di cippato ottenuta con filiera tradizionale e tipica dell'Appennino Toscano (Centro Italia), e di compararlo con la produzione della stessa quantità di cippato prodotto con una filiera innovativa, per l'impiego di un opportuno processore.

3.2.2.2 Campo di applicazione dello studio

Per determinare il campo di applicazione dello studio sono stati definiti i seguenti elementi di criticità: unità funzionale, confini di sistema, periodo di riferimento, qualità dei dati.

3.2.2.2.1 Definizione dell'unità funzionale

Nel caso oggetto di studio l'unità funzionale usata è 1 MJ, essendo l'energia termica il prodotto da considerare quale output della filiera energetica analizzata. E' stato, inoltre, considerato che la filiera abbia quale output soltanto il prodotto "energia"; infatti, anche se durante il processo di combustione del cippato si producono ceneri,

tali ceneri non sono state considerate come sottoprodotto ma come rifiuto solido e, quindi, smaltito in discarica.

Per rispondere al secondo obiettivo è stata fatta un'ulteriore LCA utilizzando come unità funzionale 1 kg di cippato prodotto.

3.2.2.2.2 Definizione dei confini di sistema

Nell'analisi del ciclo di vita della produzione di energia termica a partire da biomasse legnose forestali è possibile delineare i processi principali per mezzo del metodo IDEFO (Integration Definition for Function mOdeling). Mediante tale modello il ciclo di vita della fiera legno energia analizzata viene scomposto in un insieme di attività collegate tra di loro (figura 19).

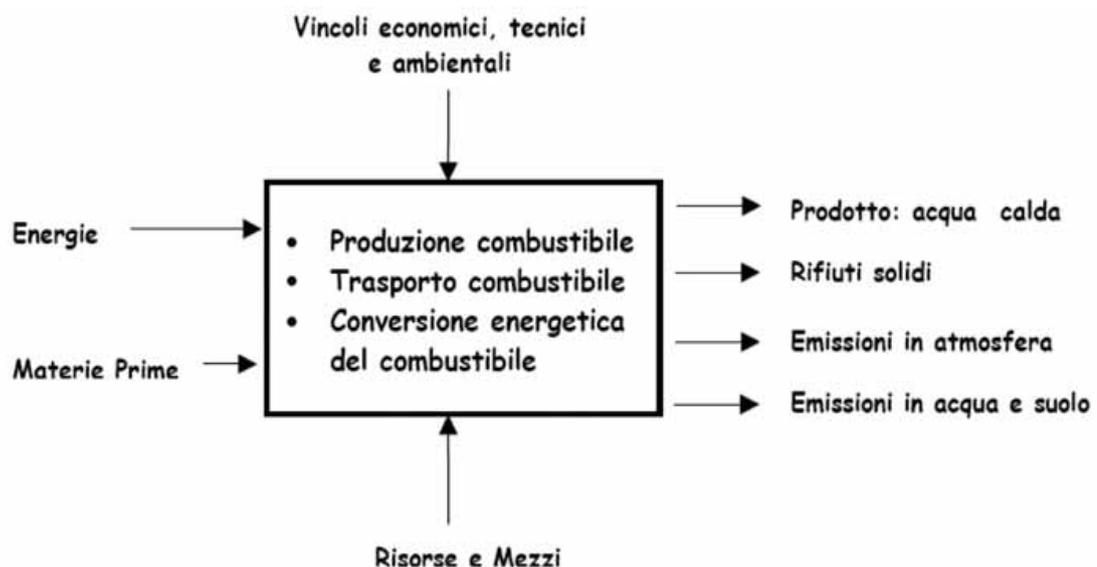


Fig. 19 Processi principali secondo il metodo *Integration Definition for Function mOdeling* (IDEFO) della filiera legno energia

Nel diagramma IDEFO gli elementi analizzati sono:

- ✓ le attività, individuate dalle caselle, ovvero la produzione di cippato, dal taglio dell'albero fino al trasporto del cippato in azienda agricola, e la produzione di energia ottenuta dalla combustione del cippato in caldaia. Nello studio è escluso il processo di produzione del legno delle faggete perché naturali e non soggette a operazioni colturali. Lo studio si ferma a livello di impianto termico aziendale per le varie utilizzazioni ed esclude tutti i processi a valle della caldaia (cogenerazione, essiccazione ecc.);

- ✓ gli input ovvero quegli elementi che vengono modificati durante le attività principali e individuati dalle frecce entranti dal lato sinistro della casella; nel caso oggetto di studio sono: il legname derivato dai diradamenti di faggete, l'energia dei combustibili fossili utilizzati nelle fasi di taglio, trasporto e cippatura, l'energia del cippato e l'energia elettrica impiegate nell'impianto termico;
- gli output ovvero il risultato delle modificazioni, indicati dalle frecce uscenti dal lato destro della casella; nello studio sono: i prodotti (energia termica), le emissioni (aria, acqua e suolo) e i rifiuti (ceneri);
- i meccanismi ovvero le azioni che permettono lo svolgimento delle attività (personale, impianti) individuati dalle frecce entranti dal basso; nello studio sono: taglio, esbosco, cippatura, trasporto, combustione.

Il diagramma così impostato ha consentito di scegliere i processi più importanti della LCA, in modo da poter inventariare i dati occorrenti per definire correttamente gli impatti ambientali.

3.2.2.2.3 Periodo di riferimento

Il periodo di riferimento per il rilevamento dei dati è di due anni.

3.2.2.2.4 Definizione del livello di qualità dei dati

Per ciascun processo della filiera energetica analizzata, SimaPro ha fornito indicazioni relative alla qualità dei dati riportando informazioni su:

- consumi ed emissioni inclusi nel processo da macchinari ed attrezzature e/o per la produzione dei macchinari e attrezzature stesse;
- il gruppo tecnologico di appartenenza e le caratteristiche tecniche;
- lo stato tecnologico, ovvero se la tecnologia usata è antiquata, esistente, nuova o rientra nella definizione di BAT (Best Available Technology);
- l'anno di riferimento, indicando se il processo in questione è modellato sulla base di analoghi processi tenendo conto la realtà attuale o futura;
- la localizzazione spaziale del processo indicando Paese o continente coinvolto;
- le fonti bibliografiche di riferimento;
- l'autore;
- criteri di esclusione o cut-off;
- un indicatore di qualità.

Sulla base delle informazioni riportate i dati sono stati usati tal quali o come riferimento per l'utilizzo di dati primari. Sono stati utilizzate banche dati europee (Ecoinvent system processes, ecoinvent unit processes).

3.2.3 Raccolta dati (fase di inventario)

Seguendo il processo logico delineato, è possibile adattare le attività ed i flussi di materia ed energia per la filiera legno-energia (figura 20); la filiera, suddivisa in due principali produzioni legno-cippato e cippato-energia, coinvolge tutti i processi e sotto processi, oggetto di studio e descritti in seguito dettagliatamente. I dati inventariati dal software sono stati la base di riferimento per tutti quei valori necessari alla LCA; i dati inseriti nel software sono stati rilevati direttamente da sperimentazione in campo.

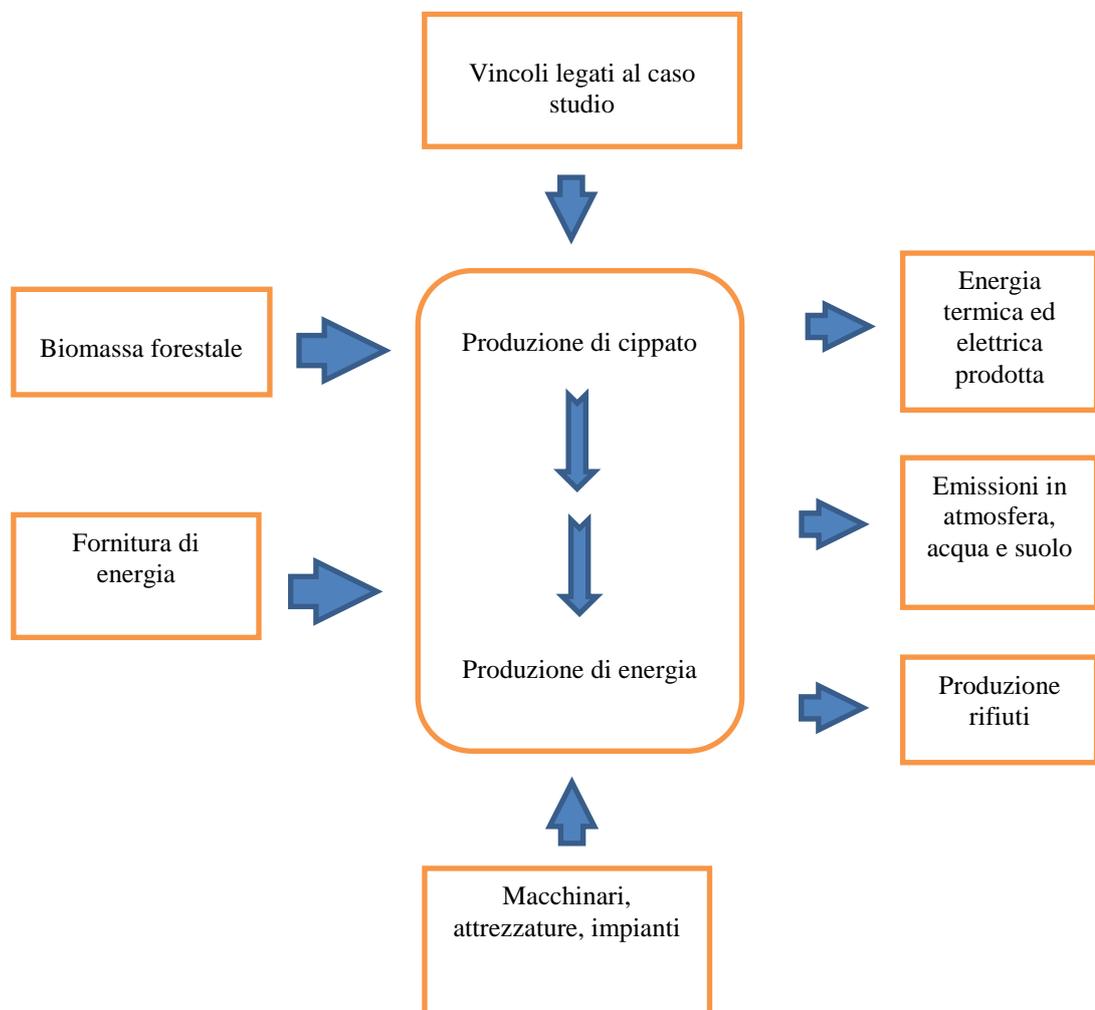


Fig.20 Diagramma IDEFO per la filiera legno-energia considerata nello studio

3.2.3.1 Raccolta dati della produzione cippato

3.2.3.1.1 Aree sperimentali

Nell'area studio è stato preso in esame il processo di produzione del cippato, con metodo tradizionale, a partire dal legno ottenuto dai diradamenti di fagete transitorie (*Fagus sylvatica* L.), allo stato puro e spontaneo (non viene effettuata né concimazione né irrigazione), per una massa complessiva non superiore al 30% della massa totale, al fine della valutazione della sostenibilità ambientale della filiera energetica.

Per verificare, in termini di impatti, l'influenza sulla filiera analizzata dell'introduzione di un sistema di abbattimento innovativo, mediante l'impiego di opportuno processore, è stato preso in esame anche questo tipo di abbattimento, sia durante il periodo invernale che primaverile-estivo.

Sono state individuate, mappate e caratterizzate le parcelle sperimentali rappresentative delle diverse condizioni geomorfologiche, delle diverse essenze dell'area e dei due tipi di metodo di produzione legno-cippato considerati, tradizionale ed innovativo (figure 21, 22, 23). Nella produzione tradizionale la fase di taglio viene effettuata con l'impiego di motosega, in quella innovativa viene effettuata con l'impiego di un processore. Entrambi i metodi verranno dettagliatamente descritti in seguito.



Figg. 21 22 23 Rispettivamente: faggeta dell'area di saggio; rilievo della superficie analizzata; rilievi dendrometrici

In particolare, sono state individuate, per ciascun metodo di produzione, 3 parcelle da diradare di un ettaro ciascuna.

Ognuna di queste aree è stata identificata per due diverse condizioni:

- 1) Semplicità (pendenza lieve, terreno pianeggiante, vicinanza alla viabilità, etc.)
- 2) Criticità (pendenza medio/elevata, terreno sconnesso, lontananza viabilità, etc.).

I dati raccolti sono stati elaborati al fine di renderli disponibili alla trattazione con i software GIS (Geographic Information System) per l'analisi spaziale. A tale scopo i dati di interesse sono stati georeferenziati e, quando opportuno, interpolati nello spazio con il supporto di ArcGIS 9.2. In questo modo sono stati creati ulteriori layers informativi in formato vettoriale e raster (figura 24).

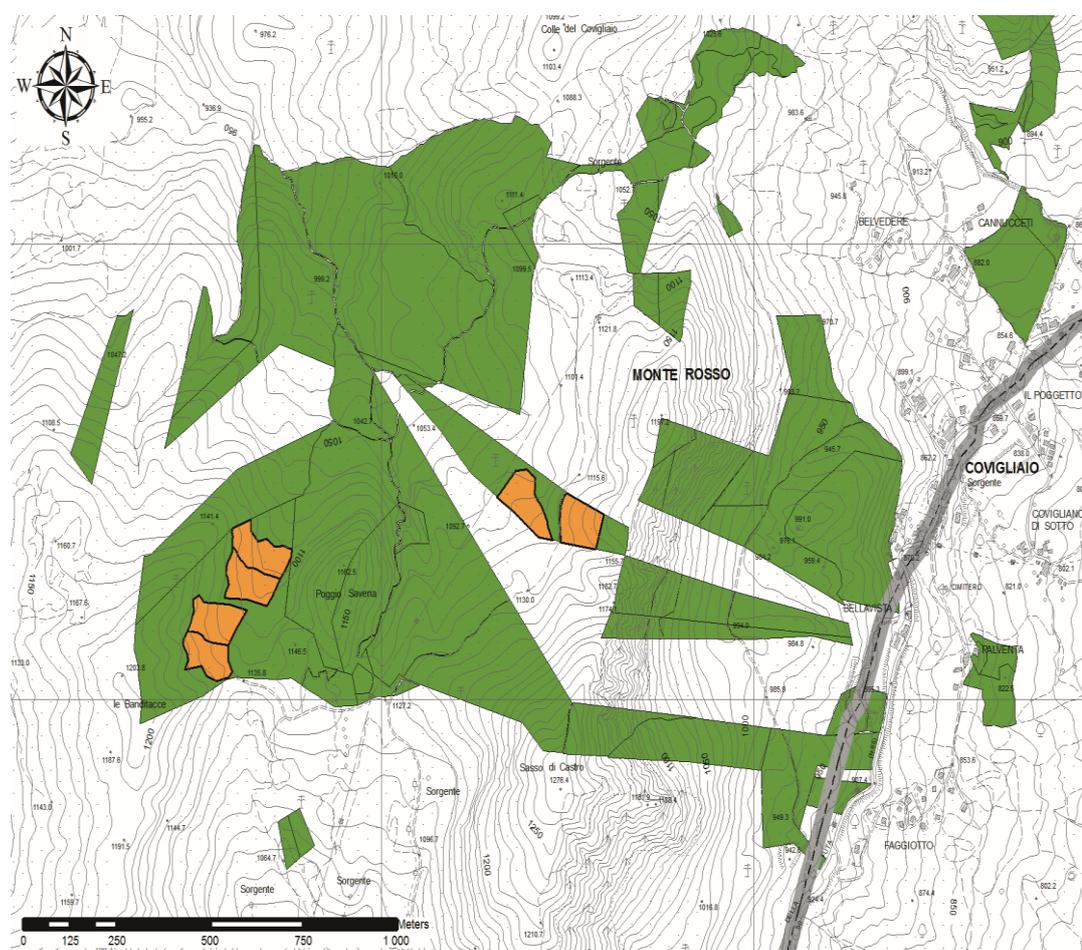


Fig. 24 Carta tecnica regionale digitale con evidenziate le aree sperimentali

3.2.3.1.2 Rilievi produzione cippato

Per il rilievo dei dati, tenendo conto delle esigenze dell'analisi LCA, la parte della filiera energetica relativa alla produzione di cippato è stata suddivisa nelle seguenti fasi operative:

- Fase di taglio: abbattimento, depezzatura, concentrazione presso la rete viaria.
- Fase di esbosco: carico, trasporto, accatastamento all'imposto e stagionatura.
- Fase di cippatura: trasporto legname dall'imposto all'impianto, cippatura.
- Fase di distribuzione: trasporto del cippato dall'impianto di stoccaggio all'utilizzatore finale.

Tutte le operazioni sono state effettuate dall'azienda privata forestale e il sistema di lavoro è stato quello del legname corto (Short Wood System-SWS) con produzione di spezzoni di 2 metri di lunghezza. E' stato considerato nel processo il solo materiale esboscato senza tenere conto delle ramaglie, che incidono mediamente del 30%, poiché queste vengono utilizzate all'esterno della filiera (per produrre fascine per uso familiare) o, in parte, lasciate sul letto di taglio. Poiché è stata assunta la fase di taglio come inizio della filiera energetica è stata considerata una distanza nulla per il raggiungimento dell'area di lavoro da parte dei macchinari.

Per ogni fase, sono stati rilevati:

1. Tempi di impiego dei macchinari ed attrezzature utilizzate
2. Consumi dei macchinari utilizzati
3. Produttività media di lavoro

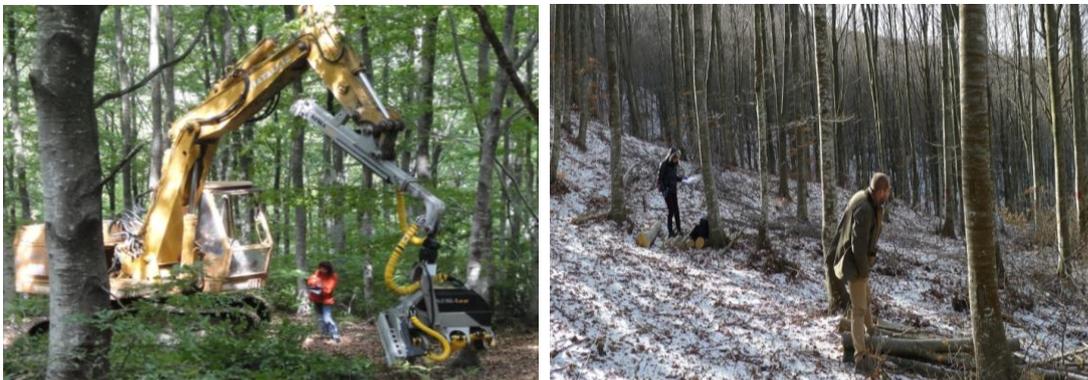


Fig. 25 Rilievi della produttività del processore

I rilievi (figura 25) dei tempi di impiego dei macchinari e delle attrezzature e dei consumi sono stati effettuati secondo metodologia indicata in letteratura (Berti et al., 1989) utilizzando delle schede di rilievo appositamente elaborate per ogni fase: abbattimento, esbosco, cippatura, trasporti (tabelle 3 e 4).

Nello specifico per la raccolta dei dati sono stati impiegati circa 24 ore per i rilievi dendrometrici delle aree sperimentali, 16 ore ad ettaro per il taglio e 16 per l'esbosco (in totale 192 ore per taglio ed esbosco), 8 ore ad ettaro per cippatura e trasporti.

Tab.3 Scheda impiegata per i rilievi di abbattimento delle piante con processore

metodo del rilievo separato dei tempi delle fasi di lavoro (Berti, Piegai '89)					
rilievo PROCESSORE					
SCHEDA N°:	età popolamento:		Consumi/giorno:		
DATA:	sup. utilizzata:		Classe di pendenza:		
CANTIERE N°:			Note:		
RILEVATORI:					
Quantità e tipologia di materiale lavorato/giorno:					
mattina			pomeriggio		
ora inizio:	ora fine:		ora inizio:	ora fine:	
Operazione	t (min,sec)	Operazione	t (min,sec)	Operazione	t (min,sec)
preparazione		abbattimento		abbattimento	
trasferimento al cantiere		allestimento		allestimento	
ingresso nel cantiere		concentramento		concentramento	
uscita dal cantiere		spostamenti		spostamenti	
imprevisti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
allestimento		allestimento		allestimento	
concentramento		concentramento		concentramento	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
∅ pianta:	TNE (abbattim. allestim. accumulo):		TNA (spostam):	TM:	
∅ pianta:	TNE (abbattim. allestim. accumulo):		TNA (spostam):	TM:	
∅ pianta:	TNE (abbattim. allestim. accumulo):		TNA (spostam):	TM:	
∅ pianta:	TNE (abbattim. allestim. accumulo):		TNA (spostam):	TM:	

Tab4 Scheda impiegata nei rilievi di abbattimento piante con motosega

metodo del rilievo separato dei tempi delle fasi di lavoro (Berti, Piegai '89)					
rilievo MOTOSEGA					
SCHEDA N°:	età popolamento:		N° operai:	N° pieni/giorno:	
DATA:	classe di pendenza:		Mezzi utilizzati:		
CANTIERE N°:			Note:		
RILEVATORI:					
mattina			pomeriggio		
ora inizio:	ora fine:		ora inizio:	ora fine:	
Operazione	t (min,sec)	Operazione	t (min,sec)	Operazione	t (min,sec)
affilature		abbattimento		abbattimento	
rifornimenti		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
manutenzione		spostamenti		spostamenti	
rimessaggio		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	
abbattimento		abbattimento		abbattimento	
livellamento ceppaia		livellamento ceppaia		livellamento ceppaia	
spostamenti		spostamenti		spostamenti	
tempi morti		tempi morti		tempi morti	

I dati relativi alla produttività di lavoro espressa in m³/ora del processore sono stati rilevati tramite computer MOTOMIT IT installato su escavatore.

I dati rilevati sono stati elaborati ed espressi come valori medi.

E' stato considerato un peso specifico medio del legname di 0,7 t/m³ e un rapporto di conversione legno-cippato (G30) di 2,5.

Nella figura 26 è rappresentato il diagramma di flusso delle fasi di lavoro per la produzione di cippato .

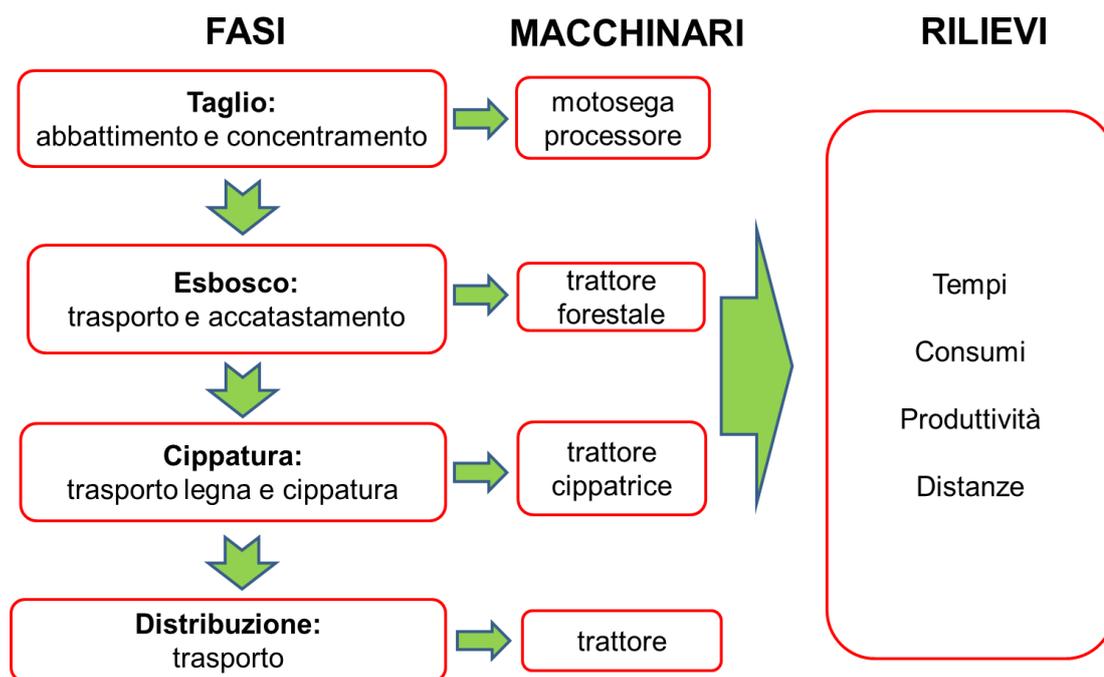


Fig.26 Diagramma di flusso delle fasi di lavoro per la produzione cippato.

3.2.3.2 Raccolta dati della produzione energia

E' questa la parte della filiera analizzata in cui è prevista la conversione energetica del cippato mediante combustione in caldaia per il riscaldamento dell'acqua che sarà poi distribuita alle varie utenze ed utilizzata tal quale (teleriscaldamento) oppure per alimentare altri impianti (essiccatore fieno, microgeneratore).

Il funzionamento della caldaia, delle pompe di ricircolo acqua, dei sistemi di depurazione fumi e rimozione ceneri e di quant'altro necessario per la conversione energetica finale, avviene tramite corrente elettrica.

Per quanto riguarda il consumo di energia elettrica è stato considerato un mix di elettricità, a medio voltaggio, che include la produzione interna italiana e le

importazioni, le perdite di energia che si registrano durante la trasmissione e la trasformazione in alta tensione. L'energia elettrica generata in Italia deriva per il 44% dal gas, 12% da combustibili solidi, 5% da petrolio, 5% altri combustibili, 15% idroelettrica, 6% altre rinnovabili e per il 14% è importata (Enea, 2010).

La generazione di corrente elettrica e termica prodotta dalla microgenerazione, considerata come produzione "evitata", è stata presa in esame solamente al termine dell'analisi LCA della filiera per valutarne i possibili effetti e per poter avere i primi orientamenti in merito. I rilievi sono stati fatti per un breve periodo in officina mediante un contatore elettrico, un contatore volumetrico di portata a lettura visiva, un termometro con lancetta indicatrice della temperatura sulla linea di mandata e un termometro con lancetta indicatrice della temperatura sulla linea di ritorno.

3.2.3.2.1 Rilievi dei consumi, delle rese e delle emissioni dell'impianto termico

Per quanto riguarda i consumi, si distinguono quelli di cippato e di energia elettrica, ed entrambi sono stati monitorati giornalmente, nelle varie stagioni e, successivamente, sono stati calcolati i consumi medi annui.

Per le rese sono stati misurati i parametri di funzionamento dell'impianto ed, in particolare, la potenza termica erogata sia a pieno carico che a carico parziale; le rese (prodotti evitati) relative alla cogenerazione non sono state monitorate sull'impianto ma rilevate dalle prove in officina del prototipo.

Per l'effettuazione delle misure è stata predisposta della strumentazione manuale installata sul collettore dell'impianto. In particolare, su ciascuna delle quattro linee di alimentazione termica è stata installata la seguente strumentazione (figura 27):

- Contatore volumetrico di portata a lettura visiva
- Termometro con lancetta indicatrice della temperatura sulla linea di mandata
- Termometro con lancetta indicatrice della temperatura sulla linea di ritorno



Fig. 27 Strumenti installati per i rilievi nell'impianto termico dell'azienda Riccianico

Il rilevamento dati è avvenuto tramite:

- ✓ linea stalla: tre letture giornaliere in corrispondenza delle mungiture (alle ore 8.00 e alle 18.00) e a metà giornata (ore 13.00) effettuate a campionamento nel periodo invernale, primaverile, estivo ed autunnale.
- ✓ linea teleriscaldamento: due letture giornaliere (alle ore 8.00 e alle 18.00) effettuate a campionamento nel periodo invernale, primaverile, ed autunnale.
- ✓ linea impianto di essiccazione: due letture giornaliere corrispondenti rispettivamente al momento dell'avviamento del ciclo di essiccazione ed al momento del termine del ciclo di essiccazione effettuate in due diversi mesi di lavorazione del foraggio appena tagliato (maggio e settembre).

E' stata misurata la produzione media di cenere prodotta durante la combustione del cippato nella caldaia per un totale annuo di 345 kg (0,5% del cippato consumato) ed è stata fatta l'analisi chimica di un campione di ceneri.

Per le emissioni sono stati utilizzati i dati rilevati durante certificazione della caldaia e monitorati durante il funzionamento della caldaia mediante apposito programma, i dati sono stati confrontati con quelli più recenti presenti in letteratura.

In sintesi, nella figura 28 sono riportati i rilievi effettuati sulle varie linee che compongono l'impianto termico.

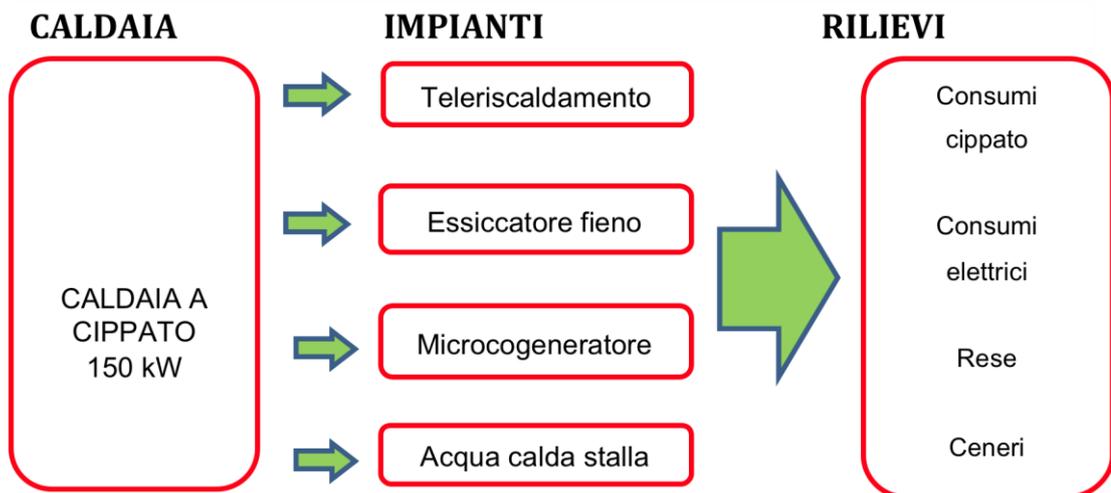


Fig.28 Diagramma di flusso per la produzione di energia termica

4. Risultati e discussione

I dati, rilevati direttamente nel cantiere forestale del Consorzio Forestale Mugello e nell'impianto termico dell'azienda agricola Riccianico, sono stati elaborati per ciascuna fase dell'intera filiera energica, dal taglio delle piante alla produzione di energia termica, per essere successivamente analizzati mediante metodologia LCA.

Tenendo presente gli obiettivi dello studio, ovvero l'analisi della sostenibilità ambientale di una filiera legno-energia dell'Alto Mugello e l'impatto causato dall'introduzione di un aspetto innovativo (processore) nella fase di taglio delle piante, i risultati dell'intera filiera, dalla produzione di cippato fino alla produzione di energia, vengono presentati in comparazione a quelli della filiera a combustibili fossili (gasolio). Per la prima parte della filiera i risultati evidenziano la comparazione tra la filiera messa a punto con l'introduzione del processore e quella che prevede l'uso di motosega.

Nel primo capitolo sono riportati i risultati ottenuti per ciascuna fase, nei capitoli successivi vengono presentati i risultati della LCA.

4.1 – Le differenti fasi della filiera

4.1.1 Fase di taglio

Nella produzione di combustibile tradizionale l'abbattimento e il depezzamento delle piante viene effettuato con motosega, mentre l'allestimento e il concentramento viene effettuato manualmente o con l'ausilio del trattore con gru. Nella filiera innovativa l'abbattimento, il depezzamento, l'allestimento e il concentramento vengono effettuati con processore.

Per l'abbattimento e il depezzamento, nella filiera tradizionale, è stata utilizzata la motosega Jonsered CS 2188 con consumi medi di 0,55 litri di miscela ad ora (l/h) e di 0,20 kg di olio ad ora (kg/h). È stata rilevata una produttività media ad operatore di 0,70 tonnellate ad ora (t/h) di legname, per un consumo medio di circa 0,80 l/t.

Per la produzione innovativa, con processore, è stato rilevato un consumo medio di 12,00 l/h di gasolio, una produttività di lavoro di 13,00 m³/h e quindi un consumo medio di 1,32 l/t (tabella 5).

Tab 5 Consumi di carburante e produttività della fase di taglio

TAGLIO	CONSUMI (l/h)	PRODUTTIVITA' (t/h)	CONSUMI (l/t)
MOTOSEGA	0,55	0,70	0,80
PROCESSORE	12,00	13,00	1,32

4.1.2 Fase di esbosco

La distanza percorsa dal punto di abbattimento alla pista forestale è, in tutte le aree sperimentali, di poco inferiore al chilometro (km) e, pertanto, è stato assunta una distanza media di 1 km.

Il trasporto dalla strada forestale all'imposto viene effettuato con trattore e rimorchio con capacità di carico di 4000 kg, la velocità di avanzamento media è stata di 15 km/h con carico e di 25 km/h senza carico e i consumi di 15-20 l/h di gasolio.

Il percorso che il trattore compie a pieno carico è stato mediamente di 4 km per arrivare all'imposto. L'unità di misura utilizzata è tkm, che indica i km percorsi da 1 tonnellata di carico.

Il materiale accatastato all'imposto è stato stagionato per ridurre il contenuto di umidità. E' stato scelto di non considerare la stagionatura nell'analisi LCA data la sua irrilevanza ai fini dell'impatto ambientale, in quanto il legname viene lasciato all'esterno ad asciugare naturalmente.

4.1.3 Fase di cippatura

Tale fase viene realizzata in apposito impianto aziendale. Il legname stagionato viene trasportato, durante il periodo estivo, dall'imposto all'impianto per essere cippato; la distanza media dall'imposto all'impianto di cippatura aziendale è di 10 km.

Per il trasporto si è utilizzato un trattore con gru con capacità di carico di 28 tonnellate e consumi medi di 22 l/h di gasolio.

Per la cippatura è stata utilizzata una cippatrice a coltelli della JENZ modello HEM 561, 480 CV, montata su camion da 460 CV; il consumo medio è stato di 40 l/h di gasolio (46 MJ per tonnellata di cippato) e la produttività media, con griglia da 8 cm di lato, è stata di 110 m³/h di cippato. La fase di stoccaggio del cippato non è stata

considerata ai fini dell’LCA poiché avviene all’aperto nei pressi dell’impianto di cippatura e non comporta consumi aggiuntivi.

4.1.4 Fase di trasporto del cippato in azienda

In questa fase è stato trasportato il cippato dall’impianto all’utente finale, l’azienda agricola Riccianico, mediante un autocarro a sponde alte con capacità di carico di 28 t, con una distanza percorsa di 12 km (tabella 6).

Tab 6 Dati della fase di trasporto del legname dal bosco all’azienda

TRASPORTO	CARICO (t)	CONSUMI (l/t)	DISTANZA (km)
TRATTORE IN BOSCO	4	15	4
TRATTORE SU STRADA			
-imposto/cippatura	28	22	10
-cippatura/azienda	28	22	12

4.1.5 Fase di produzione di energia termica

Nell’ultima fase della filiera il cippato trasportato all’interno dell’azienda zootecnica è stato convertito in energia termica, ovvero è stato bruciato all’interno di una moderna caldaia da 150 kW (tabella 7), per riscaldare acqua calda da distribuire per varie utilizzazioni: rete di teleriscaldamento (tabella 8), sistema di essiccazione dei foraggi (tabella 9) e impianto microgenerativo (tabella 10).

Il consumo medio annuo di cippato è stato di 69 tonnellate per soddisfare un fabbisogno di energia termica annua totale di 210.833 kWh (758.998 MJ) di cui in gran parte usato per teleriscaldamento (68,56%), in misura minore per la cogenerazione (23,72%) e, infine, per l’essiccazione del fieno (7,73%) (tabella 11). Il cippato utilizzato è stato analizzato ed è stato determinato il potere calorifico inferiore (PCI) medio di 3,4 kWh/kg con contenuto di umidità media del 20%.

Tab.7 Caratteristiche della caldaia HDG a cippato

Caratteristiche	Valore	Unità di misura
Potenza termica nominale	150	kW
Rendimento caldaia a potenza nominale	90	%
Temperatura mandata acqua calda caldaia	85	° C
Temperatura ritorno acqua calda caldaia	65	° C
Ore equivalenti funzionamento medie annue	1406	ore

Tab. 8 Caratteristiche dell'impianto di teleriscaldamento

Dati medi di esercizio	Valore	Unità di misura
Fabbisogno termico medio annuo	144537	kWh _t /anno
Ore annue equivalenti funzionamento a potenza nominale della caldaia	964	ore/anno
Ore giornaliere funzionamento	14	ore/gg
Giorni annui funzionamento	69	gg/anno

Tab. 9 Caratteristiche dell'impianto di essiccazione foraggi

Caratteristiche	Valore	Unità di misura
Numero di rotoballe in batteria	8	giorni
Potenza termica nominale	110	kW
Potenza elettrica ventilatore aria	8	kW
Rendimento generatore di aria calda	90	%
Temperatura aria caldaia	45	°C
Funzionamento e consumi		
Giorni annui medi di funzionamento	15	gg/anno
Ore giornaliere funzionamento	8	ore/gg
Ore/anno equiv. funzionamento potenza nominale	120	ore/anno
Numero rotoballe essiccate	192	rotoballe
Energia termica richiesta	14667	kWh _t /anno
Energia termica prodotta	13200	kWh _t /anno
Energia elettrica richiesta	900	kWh _e /anno

Tab. 10 Caratteristiche del sistema di microgenerazione ORC

Caratteristiche	Valore	Unità di misura
Rendimento elettrico nominale	10	%
Rendimento cogenerativo totale	99	%
Potenza elettrica impianto	3	kW
Potenza termica in	30	kW
Temperatura in ingresso	85	°C
Temperatura in uscita	35	°C
Dati medi di esercizio		
Ore annue funzionamento	1500	ore/anno
Ore giornaliere funzionamento	24	ore/gg
Giorni annui funzionamento	63	gg/anno
Energia termica assorbita	45000	kWh _t /anno
Energia elettrica producibile	4530	kWh _e /anno
Energia termica producibile	40023	kWh _t /anno

Tab. 11 Richiesta di energia termica per le varie linee dell'impianto e consumi di cippato

LINEE DI ALIMENTAZIONE	ENERGIA TERMICA (kWh)	ENERGIA TERMICA (%)	CIPPATO (t)
TELERISCALDAMENTO	144537,00	68,55	47,23
MICROCOGENERATORE	50000,00	23,72	16,34
ESSICCATORE	16296,00	7,73	5,33
TOTALE	210833,00	100,00	68,90

Nella filiera di riferimento il consumo medio annuo di gasolio per alimentare le stesse utenze è stato di 18 tonnellate; la distanza media del trasporto di gasolio, dal fornitore all'azienda agricola, è stata di 30 km.

Il consumo medio annuo di energia elettrica per il funzionamento delle varie utenze, pompe di circolazione dell'acqua calda dell'impianto di teleriscaldamento, dell'essiccatore fieno e del cogeneratore, è stato di 2771 kWh (tabella 12); il consumo complessivo di energia elettrica è rimasto invariato nel caso di caldaia alimentata a cippato o a gasolio.

Tab. 12 Consumi di energia elettrica dell'impianto

LINEE DI ALIMENTAZIONE	CONSUMO ELETTRICO EQUIVALENTE (kWh)
CALDAIA HDG 150KW	1405,55
ESSICCATORE ROTOBALLE	814,81
POMPE DI CIRCOLAZIONE	551,33
TOTALE	2771,69

Le emissioni gassose delle caldaie, a cippato e a combustibile fossile, sono comparate in tabella 13.

Tab. 13 Emissioni gassose della caldaia

Emissioni	Caldaia a cippato (mg/MJ)	Caldaia a gasolio (mg/MJ)
CO	22,00	2,77
NO _x	73,00	97,22
COV	1,00	1,38
PM ₁₀	25,00	5,55
CO ₂	0,01	0,09

4.2 – Analisi LCA con il metodo ReCiPe

Completato l'inventario LCA con i risultati delle sperimentazioni in campo, è stato possibile giungere alla valutazione del carico ambientale della filiera energetica analizzata, mediante metodo ReCiPe del programma SimaPro 7.3.3 versione individualista (I/A), suddividendola nei seguenti processi: produzione cippato, produzione e utilizzo caldaia di combustione, impiego di energia elettrica, combustione del cippato e smaltimento delle ceneri.

4.2.1 Analisi LCA della filiera legno-energia

Dall'analisi dei risultati, riportati in tabella 14, è stato possibile risalire all'entità degli impatti con cui ciascun processo della filiera analizzata ha contribuito alla definizione del punteggio totale delle varie categorie di impatto, raggruppate nelle tre categorie di danno considerate nel metodo ReCiPe.

Si è notato, in particolare per le categorie *Climate change Human Health* e *Climate change Ecosystems*, *Ozone depletion*, *Ionising radiation*, *Freshwater eutrophication e ecotoxicity*, *Terrestrial ecotoxicity*, *Marine ecotoxicity* e *Fossil depletion* che il maggiore contributo è stato quello legato al consumo di elettricità, mentre per le categorie *Particulate matter formation*, *Photochemical oxidant formation*, *Terrestrial acidification* il maggior impatto è legato alla fase di combustione. Per la categoria *Human toxicity*, *Urban land occupation*, *Natural land transformation* e *Metal depletion* il processo maggiormente impattante è stato quello relativo all'uso ed utilizzo dell'impianto termico; per la categoria *Agricultural land occupation* il maggior impatto è connesso alla produzione e trasporto del cippato in azienda agricola. Il diagramma sottostante (figura 29) esprime, in percentuale, il contributo che i vari processi apportano al punteggio complessivo, relativo alle differenti categorie di impatto. In pratica visualizza graficamente e, quindi, in maniera immediata quanto riportato in forma numerica nella tabella 14.

Si è visto, infatti, che per alcune categorie il processo maggiormente impattante è stato quello legato al consumo di elettricità (cambiamenti climatici, riduzione di ozono formazione radiazioni ionizzanti, eutrofizzazione, ecotossicità acque, riduzione risorse fossili) e alla combustione del cippato (formazione di particolato, fotochimica di ossidanti e acidificazione); la produzione della caldaia è impattante in termini di tossicità, occupazione e trasformazione di terreno urbano e diminuzione di metalli. La

fase di produzione e trasporto cippato in azienda impatta sulle varie categorie in misura variabile, tra circa il 10 e il 30%, con punte superiori per ecotossicità e occupazione di terreno agricolo; infine, lo smaltimento ceneri è stato poco significativo per tutte le categorie ed è risultato più apprezzabile soltanto per l'ecotossicità terrestre.

Tab.14. Caratterizzazione degli impatti ambientali e valutazione dei danni della filiera legno-energia (D=DALY; Sp.yr= specie per anno; \$=dollaro; P= produzione cippato e trasporto in azienda; E=energia elettrica; C=produzione e utilizzo caldaia; COM= processo di combustione del cippato; S=smaltimento ceneri)

Categoria d'impatto	Unità	Totale	P	E	C	COM	S
Climate change Human Health	D	5,05 E-09	1,34 E-09	2,70 E-09	9,49 E-10	0	5,77 E-11
Ozone depletion	D	2,23 E-13	7,60 E-14	1,17 E-13	2,57 E-14	0	4,47 E-15
Human toxicity	D	8,92 E-11	2,10 E-11	2,48 E-11	4,25 E-11	0	8,94 E-13
Photochemical oxidant formation	D	3,70 E-12	4,91 E-13	2,16 E-13	9,25 E-14	2,89 E-12	1,70 E-14
Particulate matter formation	D	1,26 E-08	8,87 E-10	6,95 E-10	2,96 E-10	1,07 E-08	3,00 E-11
Ionising radiation	D	6,68 E-12	8,02 E-13	4,31 E-12	1,48 E-12	0	8,12 E-14
Human Health	D	1,80 E-08	2,30 E-09	3,43 E-09	1,30 E-09	1,10 E-08	8,90 E-11
Climate change Ecosystems	Sp.yr	3,37 E-11	8,94 E-12	1,80 E-11	6,33 E-12	0	3,85 E-13
Terrestrial acidification	Sp.yr	8,11 E-14	1,01 E-14	1,36 E-14	2,75 E-15	5,43 E-14	3,41 E-16
Freshwater eutrophication	Sp.yr	3,41 E-14	3,94 E-15	2,25 E-14	7,44 E-15	0	2,08 E-16
Terrestrial ecotoxicity	Sp.yr	3,89 E-14	1,46 E-14	1,72 E-14	5,86 E-15	0	1,18 E-15
Freshwater ecotoxicity	Sp.yr	4,41 E-15	8,59 E-16	2,00 E-15	1,51 E-15	0	3,25 E-17
Marine ecotoxicity	Sp.yr	1,18 E-17	2,37 E-18	5,29 E-18	4,01 E-18	0	8,69 E-20
Agricultural land occupation	Sp.yr	2,10 E-13	1,03 E-13	5,51 E-14	5,12 E-14	0	1,26 E-15
Urban land occupation	Sp.yr	1,55 E-12	1,53 E-13	8,63 E-14	1,29 E-12	0	1,91 E-14
Natural land transformation	Sp.yr	2,87 E-12	4,44 E-13	5,11E-13	1,90 E-12	0	1,82 E-14
Ecosystems	Sp.yr	3,80 E-11	9,70 E-12	1,87 E-11	9,60 E-12	5,40 E-14	4,30 E-13
Metal depletion	\$	2,82 E-05	5,48 E-06	1,43 E-06	2,11 E-05	0	1,59 E-07
Fossil depletion	\$	0,008967	0,002832	0,005004	0,001009	0	0,000122
Resources	\$	0,00900	0,00284	0,00501	0,00103	0	0,00012

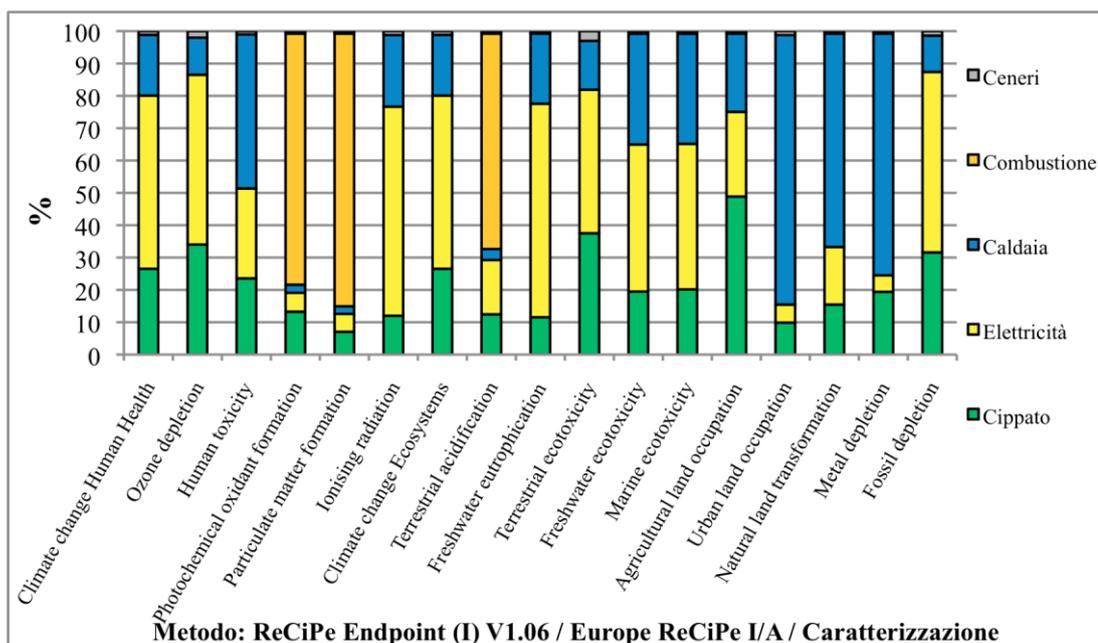


Fig.29 Caratterizzazione degli impatti ambientali della filiera legno-energia

La procedura di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto, condotta mediante metodo ReCiPe, prevede che i diversi tipi di impatto siano raggruppati per tre principali categorie di danno e, successivamente, venga calcolato un punteggio globale: in tal modo è possibile riferirsi a macro categorie di impatto, piuttosto che alle singole tipologie di impatti riscontrati.

Le tre macro categorie di danno sono:

1. *Human Health* (Salute umana) a cui contribuiscono: *Climate change Human Health, Ozone depletion, Human toxicity, Photochemical oxidant formation, Particulate matter formation, Ionising radiation.*
2. *Ecosystem Quality* (Qualità dell'ecosistema) a cui contribuiscono: *Climate change Ecosystems, Terrestrial acidification, Freshwater eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Agricultural land occupation, Urban land occupation, Natural land transformation.*
3. *Resources* (Sfruttamento delle risorse) a cui contribuiscono: *Metal depletion, Fossil depletion*

Il diagramma sottostante è relativo alle tre categorie di danni e ci consente di avere un'idea ancora più chiara ed immediata del carico ambientale della filiera (figura 30).

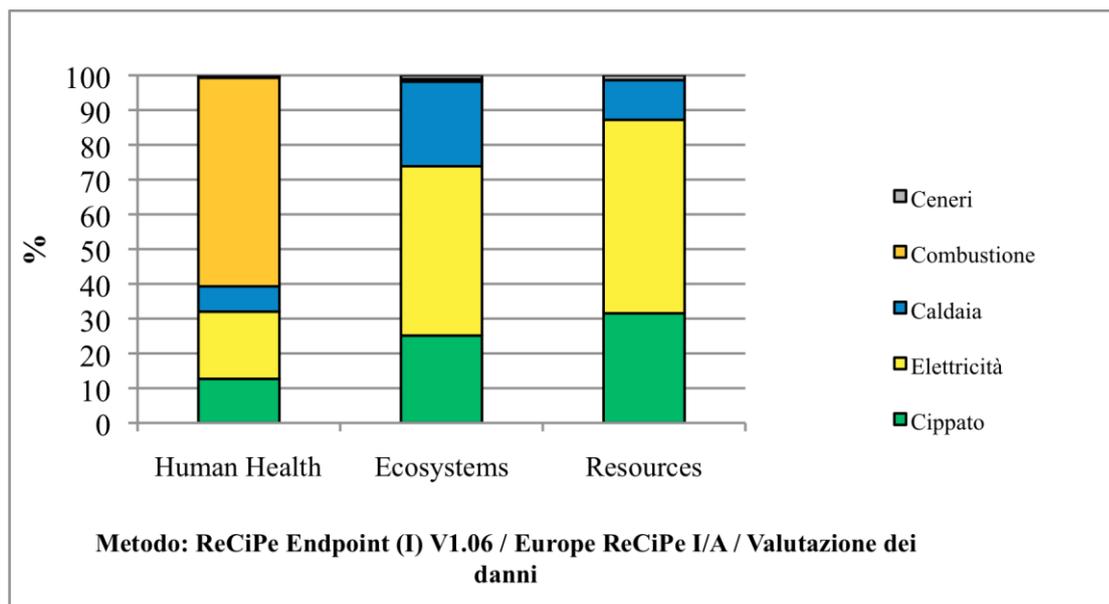


Fig.30 Valutazione dei danni della filiera legno-energia

Si può notare come il processo di combustione è stato il più impattante sulla salute umana, contribuendo da solo per circa il 60%, mentre non ha contribuito ai danni sulla qualità dell'ecosistema e sulla disponibilità delle risorse; ciò è legato principalmente alla formazione fotochimica di ossidanti e di polveri sottili durante la combustione.

Il consumo di energia elettrica è risultato il più impattante sull'ecosistema e sulle risorse e ciò dipende dal fatto che, in Italia, l'energia elettrica utilizzata è un mix che deriva in misura rilevante dall'impiego di combustibili fossili e in misura molto minore da fonti rinnovabili.

Dal grafico, inoltre, si è evidenziato che il processo di produzione di cippato in azienda ha impattato tra il 25 e il 30% sulla qualità dell'ecosistema e sulla disponibilità delle risorse mentre minore è stato l'impatto sulla salute umana (12%).

Meno importanti sono stati gli impatti legati alla produzione e uso della caldaia sulla salute umana e sulle risorse (circa il 10%), mentre più importanti sulla qualità dell'ecosistema (25%); infine, trascurabili sono stati i danni collegati allo smaltimento delle ceneri.

Dalla normalizzazione delle categorie dei danni (figura 31) è stato osservato che la filiera energetica oggetto di studio ha maggiori impatti sulla salute umana e sulla disponibilità delle risorse rispetto a quelli sull'ecosistema.

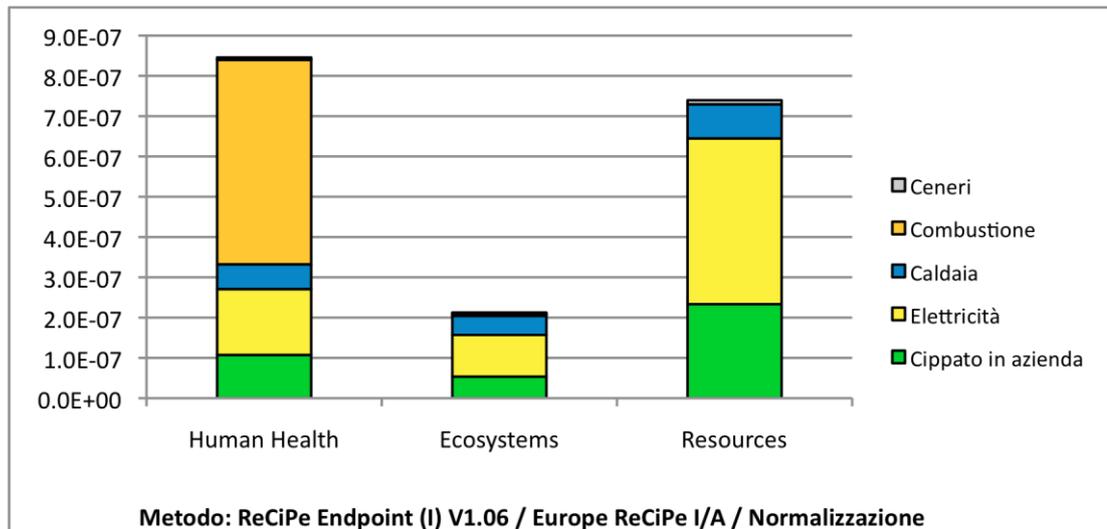


Fig.31 Normalizzazione dei danni della filiera legno-energia

Nello schema della filiera sottostante (figura 32) è stato riportato il contributo dei singoli processi alla definizione del punteggio totale dell’impatto, ottenuto con il metodo ReCiPe, considerando tutte le categorie d’impatto. Nello schema è stato evidenziato che il processo della filiera a maggior impatto ambientale è stato la combustione del cippato con un contributo del 35,7% seguito dal consumo di energia elettrica (33,1%); in ordine vengono poi il processo di produzione e il trasporto di cippato in azienda (19,4%), la caldaia (11%) ed, infine, lo smaltimento delle ceneri (0,813%).

Possiamo osservare che scendendo nel dettaglio sono state rappresentate anche le fasi della filiera tradizionale per la produzione ed il trasporto del cippato in azienda. In particolare, si può osservare che, come vedremo dettagliatamente in seguito, gli impatti sono da imputare in gran parte (11%) alle fasi di lavorazione della biomassa forestale, ed in particolare alla cippatura e, in misura minore (4,9%) alle fasi di trasporto, trattandosi di una filiera corta.

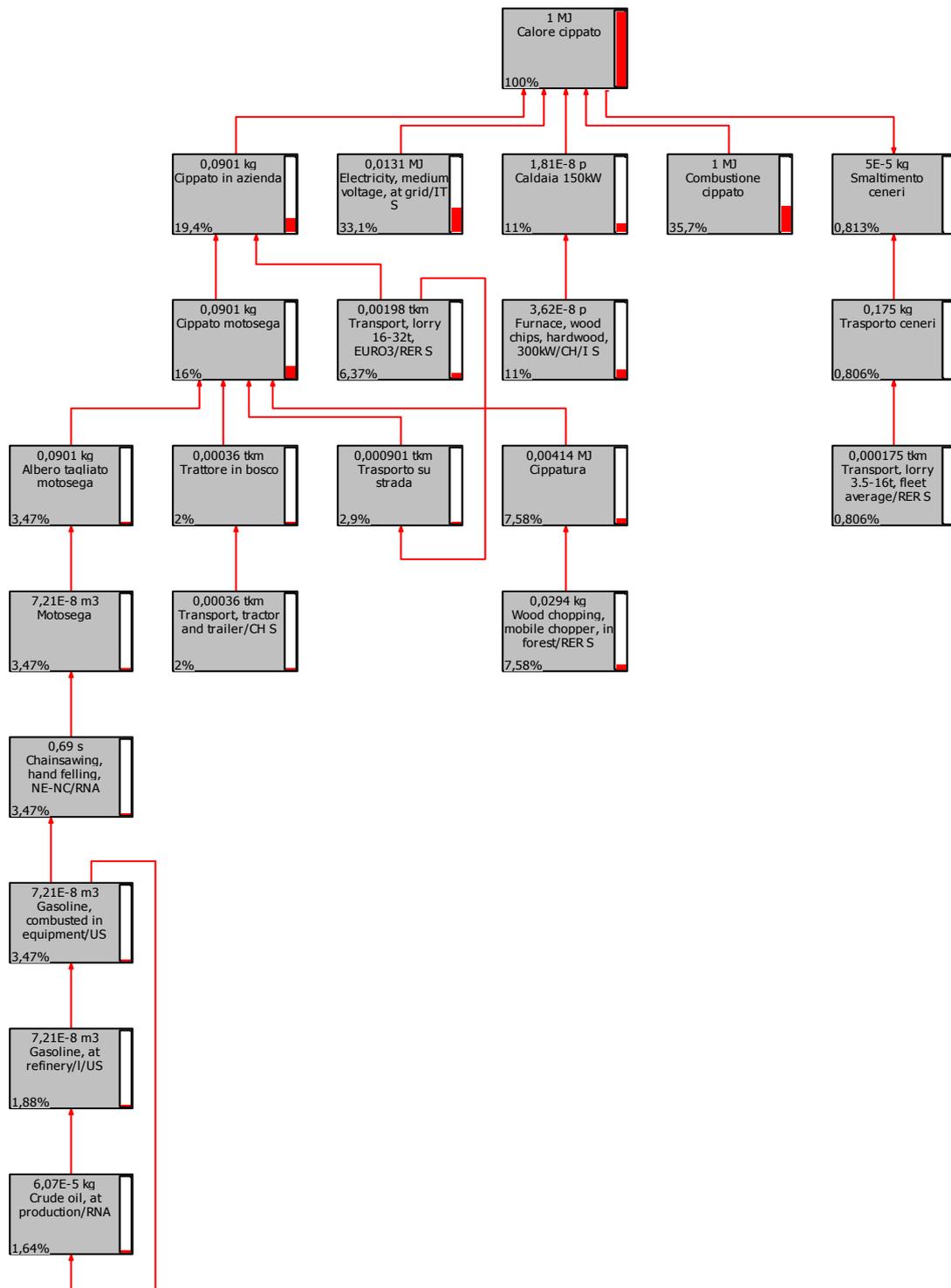


Fig. 32. Schema della filiera legno-energia analizzata

4.2.2 Analisi LCA della filiera di riferimento

Nell'area di studio, nonostante la ricchezza e la disponibilità delle biomasse forestali, il combustibile normalmente utilizzato nelle aziende agricole per alimentare i vari impianti termici è il gasolio. Per questo motivo è stata considerata la filiera energetica a gasolio come filiera di riferimento ed è stata analizzata in termini ambientali, mediante LCA con metodo ReCiPe.

Dai risultati riportati in tabella 15 è possibile risalire all'entità degli impatti con cui ciascun processo contribuisce alla definizione del punteggio totale, relativo alle tre categorie di danno considerate nel metodo ReCiPe.

Tab.15. Caratterizzazione degli impatti ambientali e valutazione dei danni della filiera di riferimento (D=DALY; Sp.yr= specie per anno; \$=dollaro; Com = processo di combustione)

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Gasolio	Elettricità	Caldaia	Trasporto	Com
Climate change	D	1,28 E-07	2,08 E-08	2,70 E-09	8,49 E-10	1,75 E-10	1,04 E-07
Human Health	D	8,22 E-12	8,06 E-12	1,17 E-13	2,77 E-14	1,36 E-14	0
Ozone depletion	D	6,12 E-10	4,78 E-10	2,48 E-11	1,07 E-10	2,33 E-12	0
Human toxicity	D	8,65 E-12	4,19 E-12	2,16 E-13	9,39 E-14	4,53 E-14	4,10 E-12
Photochemical oxidant formation	D	2,18 E-08	8,37 E-09	6,95 E-10	6,28 E-10	7,78 E-11	1,21 E-08
Particulate matter formation	D	2,60 E-11	1,92 E-11	4,31 E-12	2,32 E-12	1,38 E-13	0
Ionising radiation	D	1,51 E-07	2,97 E-08	3,43 E-09	1,59 E-09	2,56 E-10	1,20 E-07
Human Health	D	1,51 E-07	2,97 E-08	3,43 E-09	1,59 E-09	2,56 E-10	1,20 E-07
Climate change Ecosystems	Sp.yr	8,59 E-10	1,38 E-10	1,80 E-11	5,66 E-12	1,17 E-12	6,95 E-10
Terrestrial acidification	Sp.yr	3,96 E-13	1,55 E-13	1,36 E-14	5,43 E-15	9,58 E-16	2,20 E-13
Freshwater eutrophication	Sp.yr	1,56 E-13	9,02 E-14	2,25 E-14	4,29 E-14	5,05 E-16	0
Terrestrial ecotoxicity	Sp.yr	7,22 E-13	6,82 E-13	1,72 E-14	2,02 E-14	2,85 E-15	0
Freshwater ecotoxicity	Sp.yr	2,78 E-14	1,81 E-14	2,00 E-15	7,61 E-15	8,44 E-17	0
Marine ecotoxicity	Sp.yr	6,70 E-17	4,28 E-17	5,29 E-18	1,86 E-17	2,15 E-19	0
Agricultural land occupation	Sp.yr	4,29 E-13	2,35 E-13	5,51 E-14	1,36 E-13	2,70 E-15	0
Urban land occupation	Sp.yr	2,37 E-12	2,13 E-12	8,63 E-14	1,33 E-13	2,54 E-14	0
Natural land transformation	Sp.yr	4,21 E-11	4,14 E-11	5,11 E-13	1,47 E-13	6,45 E-14	0
Ecosystems	Sp.yr	9,05 E-10	1,83 E-10	1,87 E-11	6,16 E-12	1,27 E-12	7,00 E-10
Metal depletion	\$	0,0001132	2,34 E-05	1,43 E-06	8,78 E-05	4,24 E-07	0
Fossil depletion	\$	0,2264887	0,2195755	0,005004	0,0015397	0,0003695	0
Resources	\$	0,226602	0,219599	0,005005	0,001628	0,00037	0

Si è osservato che per alcune categorie (cambiamenti climatici, formazione di particolato e di ossidanti, acidificazione terrestre) il processo maggiormente impattante è la fase di combustione del gasolio e per la categoria *Metal depletion* l'impatto prevalente è legato alla produzione della caldaia. Per tutte le altre categorie di impatti il processo più rilevante è quello dell'estrazione e raffinazione del gasolio. Questo è chiaramente evidente dall'osservazione del diagramma di caratterizzazione degli impatti ambientali (figura 33).

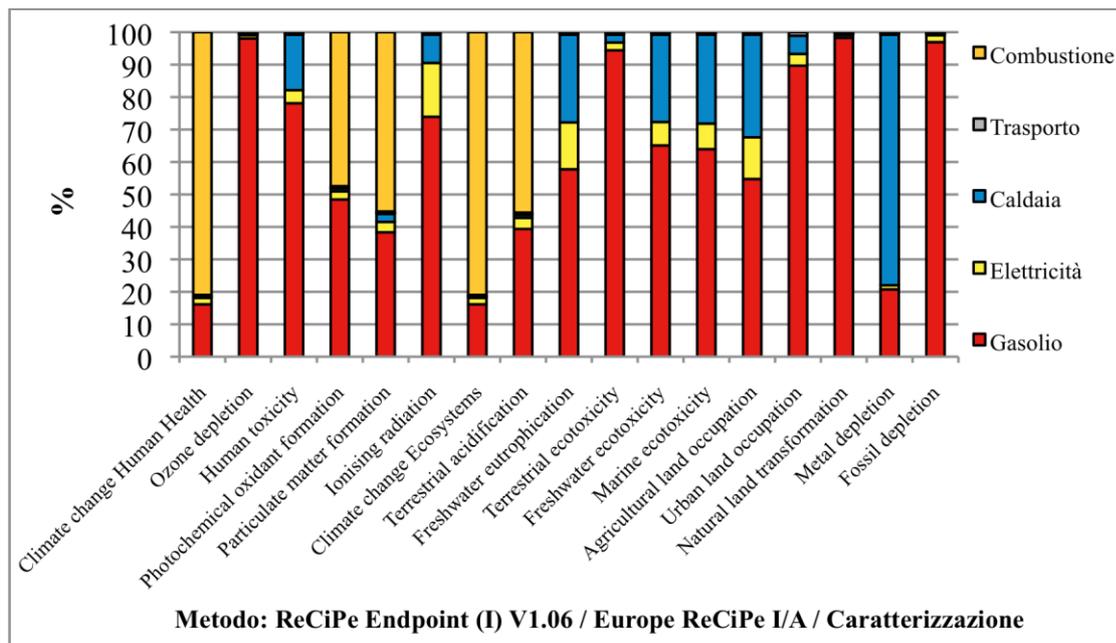


Fig. 33 Caratterizzazione degli impatti ambientali della filiera di riferimento

Le categorie di impatti considerate sono state poi raggruppate nelle tre categorie di danno e si è osservato che sulla salute umana e qualità dell'ecosistema impatta in maniera decisamente prevalente la fase di combustione, mentre sulle risorse la produzione gasolio (figura 34).

Infine, è risultato che le operazioni connesse alla fornitura di gasolio incidono sull'intera filiera, in termini di impatti, in misura del 53,2%, la combustione del gasolio incide per il 43,6% mentre è molto bassa l'incidenza dell'impatto del consumo di elettricità (2,19%) e trascurabili gli impatti legati alla produzione ed uso della caldaia (0,82%) e del trasporto del combustibile (0,16%) (figura 35).

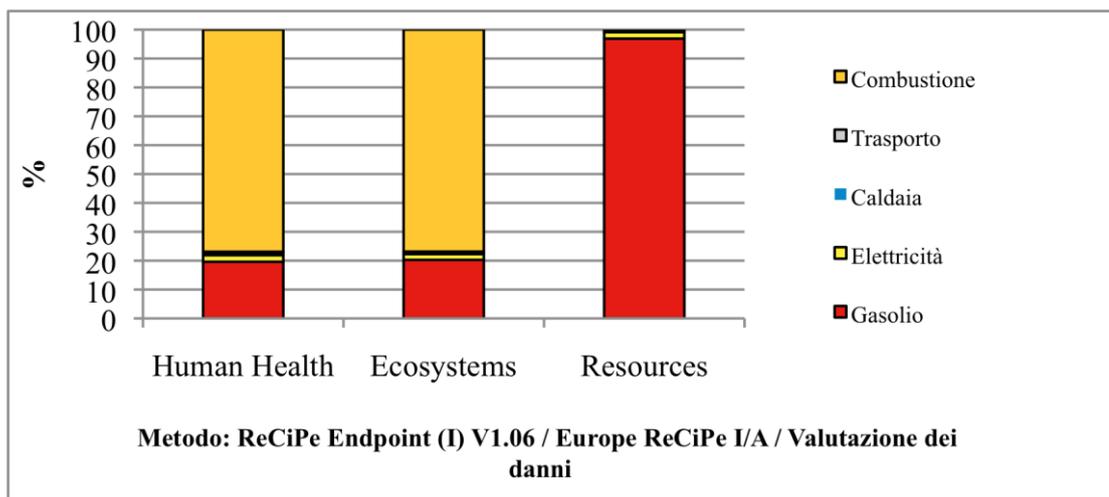


Fig. 34 Valutazione dei danni della filiera di riferimento

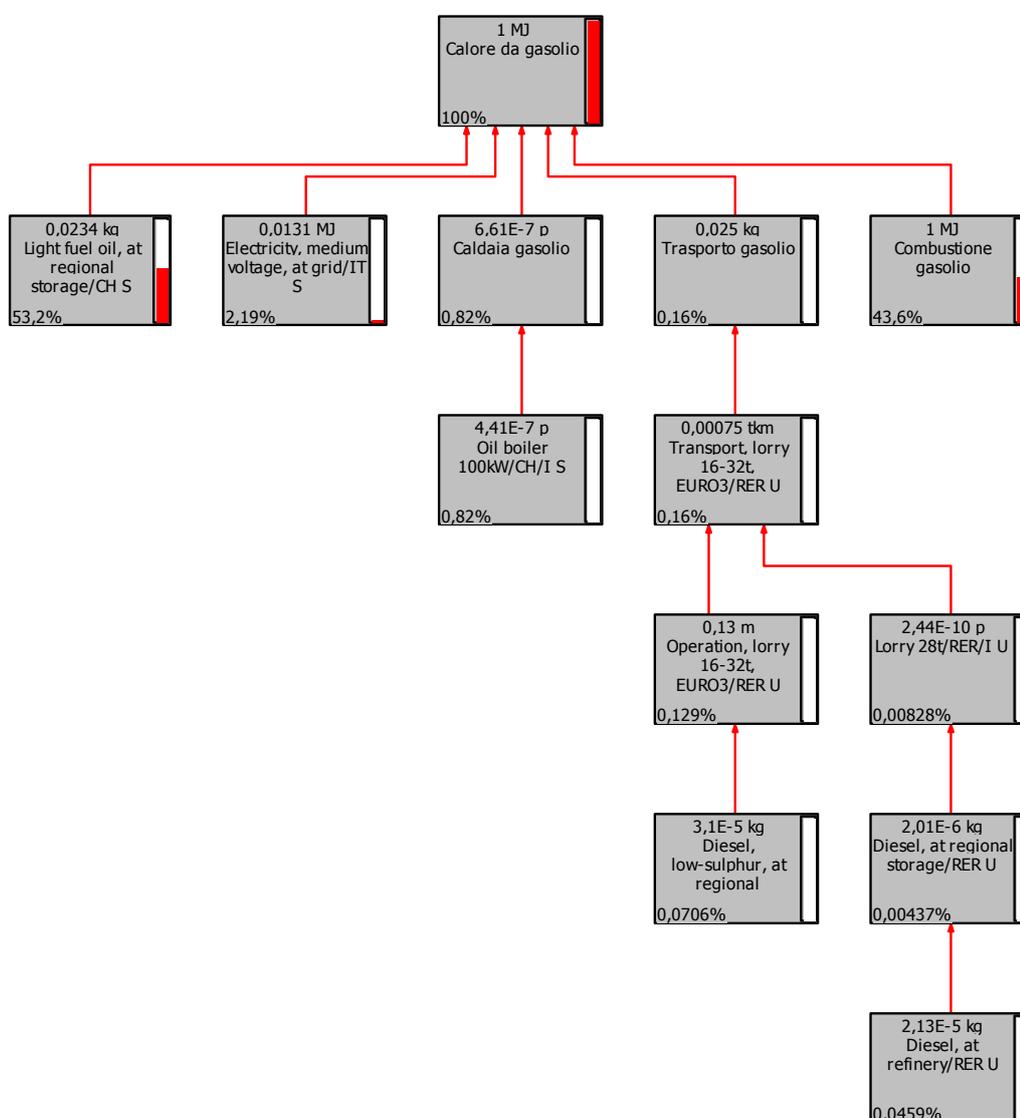


Fig. 35 Schema della filiera di riferimento

4.2.3 Confronto analisi LCA tra filiera legno-energia e quella di riferimento

Dal confronto dell'analisi LCA fra la filiera legno energia, oggetto di studio, e quella di riferimento a gasolio si è evidenziato che gli impatti ambientali derivati dalla filiera rinnovabile sono decisamente inferiori rispetto a quelli derivati dall'uso di combustibile fossile, per tutte le categorie di impatto considerate (tabella 16).

Tab 16 Confronto caratterizzazioni degli impatti ambientali e valutazione dei danni tra le due filiere (D=DALY; Sp.yr= specie per anno; \$=dollaro)

Categoria d'impatto	Unità	Calore cippato	Calore gasolio
Climate change Human Health	D	5,05 E-09	1,28 E-07
Ozone depletion	D	2,23 E-13	8,22 E-12
Human toxicity	D	8,92 E-11	6,12 E-10
Photochemical oxidant formation	D	3,70 E-12	8,65 E-12
Particulate matter formation	D	1,25 E-08	2,18 E-08
Ionising radiation	D	6,67 E-12	2,60 E-11
Human Health	D	1,77 E-08	1,51 E-07
Climate change Ecosystems	Sp.yr	3,36 E-11	8,59 E-10
Terrestrial acidification	Sp.yr	8,11 E-14	3,96 E-13
Freshwater eutrophication	Sp.yr	3,41 E-14	1,56 E-13
Terrestrial ecotoxicity	Sp.yr	3,88 E-14	7,22 E-13
Freshwater ecotoxicity	Sp.yr	4,41 E-15	2,78 E-14
Marine ecotoxicity	Sp.yr	1,17 E-17	6,70 E-17
Agricultural land occupation	Sp.yr	2,10 E-13	4,29 E-13
Urban land occupation	Sp.yr	1,54 5E-12	2,37 E-12
Natural land transformation	Sp.yr	2,86 E-12	4,21 E-11
Ecosystems	Sp.yr	3,84 E-11	9,05 E-10
Metal depletion	\$	2,82 E-05	0,000113
Fossil depletion	\$	0,008967	0,226488
Resources	\$	0,008995	0,226601

In particolare (figura 36), è emerso che la filiera a cippato impatta per circa il 5% della filiera di riferimento per le categorie *Climate change Human Health e Ecosystems*, *Ozone depletion*, *Terrestrial ecotoxicity*, *Natural land transformation*, *Fossil depletion*, e tra circa il 15-20% per le categorie, *Human toxicity*, *Ionising radiation*, *Terrestrial acidification*, *Freshwater eutrophication*, *Freshwater ecotoxicity*, *Marine ecotoxicity*. Per alcune categorie di impatto (*Photochemical oxidant formation*,

Particulate matter formation, Agricultural land occupation e Urban land occupation)

i rapporti tra le due filiere si attestano fra il 40% ed il 65%.

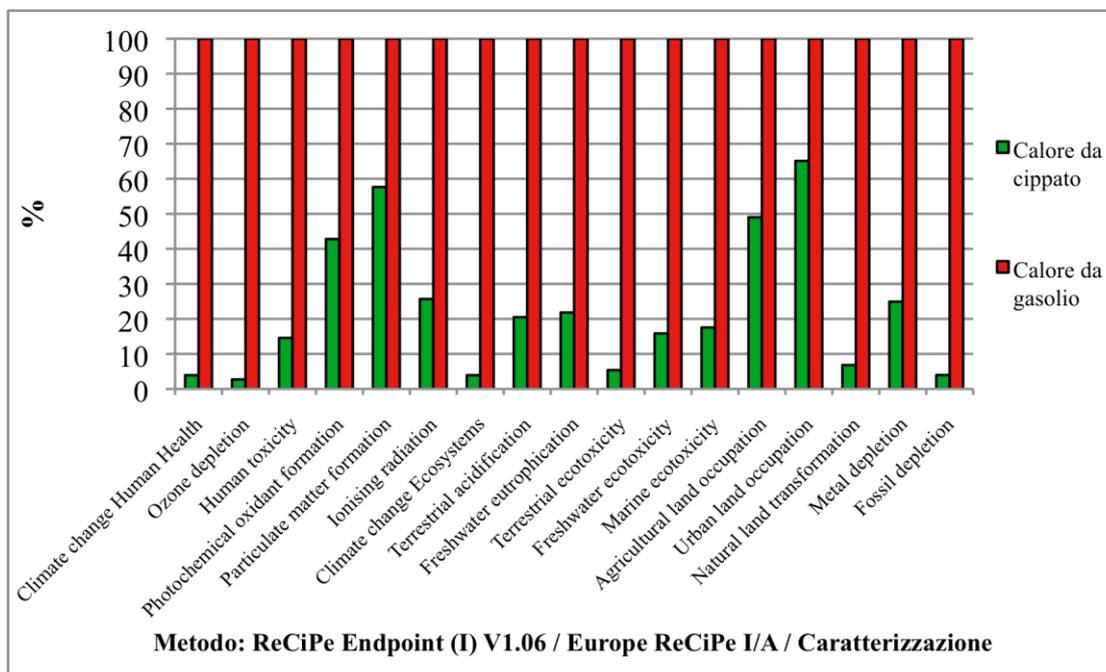


Fig.36 Confronto caratterizzazione degli impatti ambientali tra le due filiere

Dal diagramma di valutazione danni (figura 37), è emerso che la filiera a gasolio, rispetto a quella rinnovabile oggetto di studio, impatta sulla salute umana per circa il 88% in più e per il 95% sulla qualità dell'ecosistema e sulla disponibilità delle risorse.

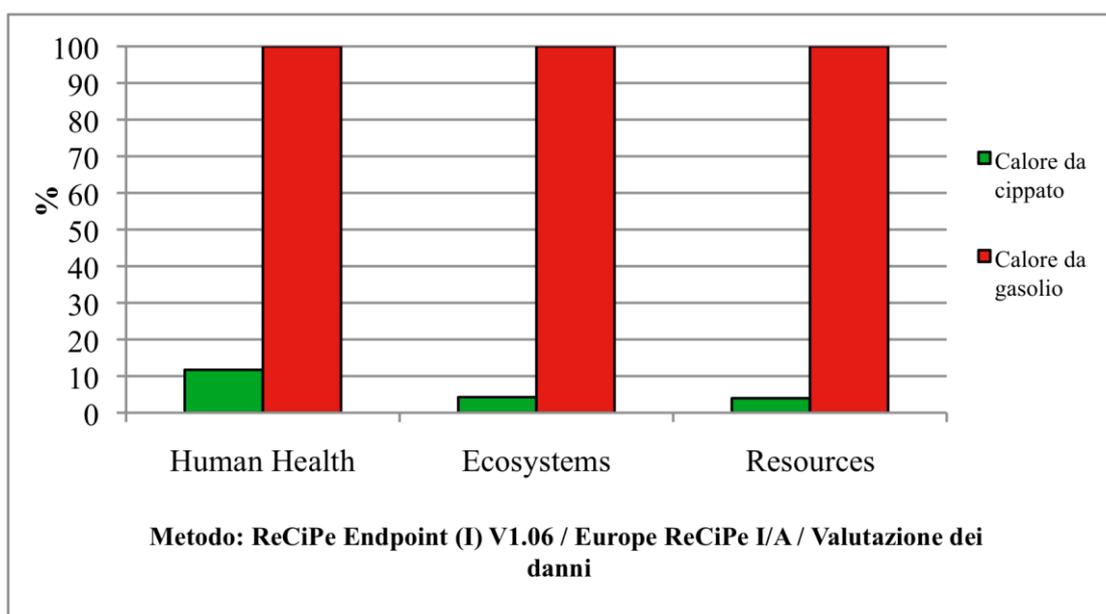


Fig.37 Confronto valutazione dei danni tra le due filiere

La normalizzazione dei dati del confronto fra le due filiere (figura 38) ha evidenziato come il minor impatto della filiera rinnovabile rispetto a quella a gasolio sia decisamente rilevante sulla disponibilità delle risorse e più contenuto sulla salute umana e sull'ecosistema. Tuttavia, anche su queste ultime due categorie il rapporto tra le due filiere, in termini di impatti ambientali, è sempre inferiore al 10% della filiera rinnovabile rispetto al combustibile fossile.

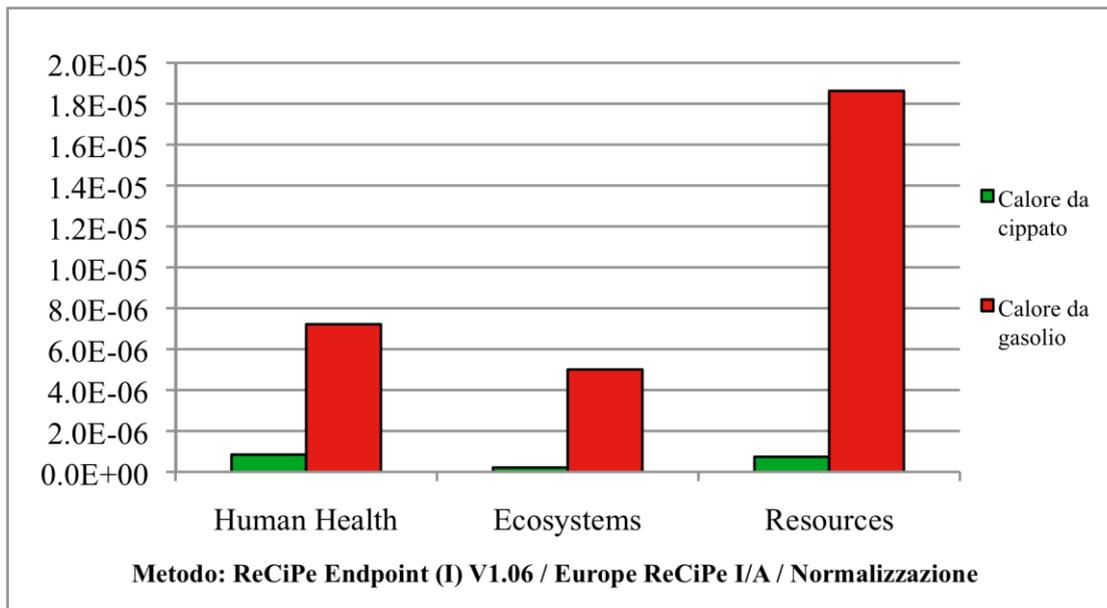


Fig 38 Confronto normalizzazione dei danni tra le due filiere

4.2.4 Analisi LCA della filiera legno-cippato tradizionale

Per verificare la sostenibilità ambientale legata all'introduzione del processore nella filiera legno-cippato è stato necessario determinare il carico ambientale della produzione di un kg di cippato ottenuta con filiera tradizionale dell'Appennino Toscano (Centro Italia), che prevede l'utilizzo di motosega per l'abbattimento delle piante. Questo è stato poi comparato con la produzione della stessa quantità di cippato prodotta con l'uso del processore.

Dall'analisi dei risultati, riportati in tabella 17, sotto riportata è stato possibile risalire all'entità degli impatti con cui ciascuna fase della filiera legno cippato tradizionale ha contribuito alla definizione del punteggio totale delle varie categorie di impatto, raggruppate nelle tre categorie di danno considerate nel metodo ReCiPe.

Tab.17 Caratterizzazione degli impatti ambientali e valutazione dei danni della filiera legno cippato tradizionale (D=DALY; Sp.yr= specie per anno; \$=dollaro)

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Albero tagliato motosega	Trattore in bosco	Trasporto su strada	Cippatura
Climate change Human Health	D	1,20 E-08	2,61 E-09	1,60 E-09	2,34 E-09	5,55 E-09
Ozone depletion	D	6,25 E-13	4,55 E-17	9,10 E-14	1,82 E-13	3,53 E-13
Human toxicity	D	1,96 E-10	6,22 E-11	2,30 E-11	3,11 E-11	7,95 E-11
Photochemical oxidant formation	D	4,72 E-12	1,40 E-12	4,10 E-13	6,05 E-13	2,31E-12
Particulate matter formation	D	8,60 E-09	1,88 E-09	1,00 E-09	1,04 E-09	4,66 E-09
Ionising radiation	D	6,69 E-12	0	2,70 E-12	1,84 E-12	2,16 E-12
Human Health	D	2,08 E-08	4,56 E-09	2,60 E-09	3,42 E-09	1,03 E-08
Climate change Ecosystems	Sp.yr	8,04 E-11	1,74 E-11	1,00 E-11	1,56 E-11	3,70 E-11
Terrestrial acidification	Sp.yr	9,67 E-14	2,64 E-14	9,50 E-15	1,28 E-14	4,80 E-14
Freshwater eutrophication	Sp.yr	3,56 E-14	0	1,30 E-14	6,74 E-15	1,57 E-14
Terrestrial ecotoxicity	Sp.yr	1,16 E-13	6,39 E-16	2,40 E-14	3,81 E-14	5,37 E-14
Freshwater ecotoxicity	Sp.yr	8,18 E-15	2,09 E-15	1,90 E-15	1,13 E-15	3,10 E-15
Marine ecotoxicity	Sp.yr	2,28 E-17	6,65 E-18	4,80 E-18	2,87 E-18	8,55 E-18
Agricultural land occupation	Sp.yr	1,09 E-12	0	9,90 E-13	3,61 E-14	6,76 E-14
Urban land occupation	Sp.yr	1,29 E-12	0	7,90 E-13	3,39 E-13	1,67 E-13
Natural land transformation	Sp.yr	3,89 E-12	0	4,40 E-13	8,60 E-13	2,59 E-12
Ecosystems	Sp.yr	8,69 E-11	1,74 E-11	1,30 E-11	1,69 E-11	3,998E-11
Metal depletion	\$	5,39 E-05	0	1,60 E-05	5,66 E-06	3,273E-05
Fossil depletion	\$	0,02552	0,00576	0,00297	0,00492	0,0118635
Resources	\$	0,02557	0,00576	0,00299	0,00493	0,0118962

Come evidente nei dati riportati in tabella 17 e nel diagramma sottostante (figura 39), nel processo produzione cippato la fase che ha impattato maggiormente su tutte le categorie ad eccezione di *Agricultural land occupation*, *Urban land occupation* è stata la “cippatura”, poiché in tale fase si ha un elevato consumo di energia derivante da combustibile fossile (diesel). Si è notato, inoltre, che la fase di “albero tagliato motosega” non impatta in diverse categorie (*Ozone depletion*, *Ionising radiation*, *Freshwater eutrophication*, *Terrestrial ecotoxicity*, *Agricultural land occupation*, *Urban land occupation*, *Natural land transformation* e *Metal depletion*) mentre ha impatti importanti (tra il 20 e il 30%) su altre categorie (*Climate Change Human Health*,

Human Toxicity, Photochemical oxidant Formation, Particulate Matter Formation, Climate Change Ecosystems, Terrestrial Acidification, Freshwater ecotoxicity, Marine Ecotoxicity e Fossil depletion).

La fase di esbosco, con trattore in bosco, è stata molto impattante (circa il 40%) sulle categorie *Ionising radiation e Freshwater eutrophication*, in misura prevalente sulla categoria (60%) *Urban land occupation* e in misura quasi esclusiva (90%) sulla categoria *Agricultural land occupation*; gli impatti del trasporto su strada si sono verificati su tutte le categorie in misura variabile nell'intervallo tra il 10-20% e ciò è strettamente connesso alle brevi distanze (12 km) tra l'impianto di produzione cippato e l'azienda utilizzatrice del cippato.

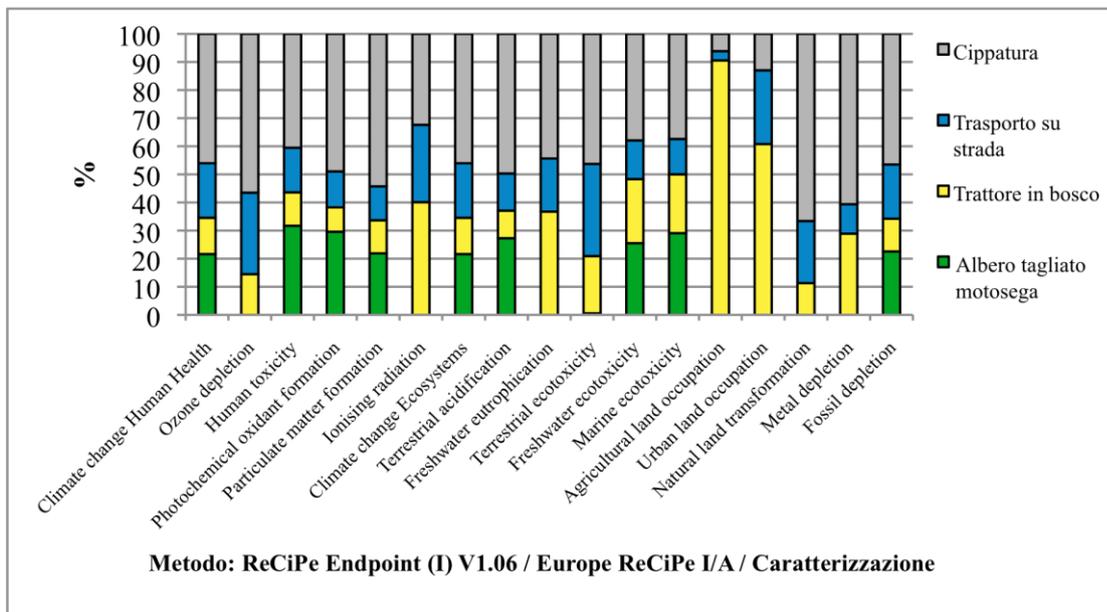


Fig. 39 Caratterizzazione degli impatti ambientali della filiera legno-cippato tradizionale

Le categorie di impatti sono state poi raggruppate nelle tre categorie di danni (figura 40).

Dal diagramma di cui sopra si è osservato che la cippatura è la fase che da sola impatta per il 50% sulla salute umana e il 46-48% sulla qualità dell'ecosistema e disponibilità delle risorse. Tale risultato è in linea con i risultati riportati in letteratura.

La fase "taglio albero motosega" ha inciso tra il 20 e il 22% circa su tutte e tre le categorie di danno. L'esbosco, effettuato con trattore in bosco, è stata l'operazione meno impattante (tra circa il 10% e il 15%); il trasporto del legname su strada

dall'imposto all'impianto di cippatura ha impattato tra il 15% (salute umana) e il 20% (qualità dell'ecosistema e disponibilità delle risorse).

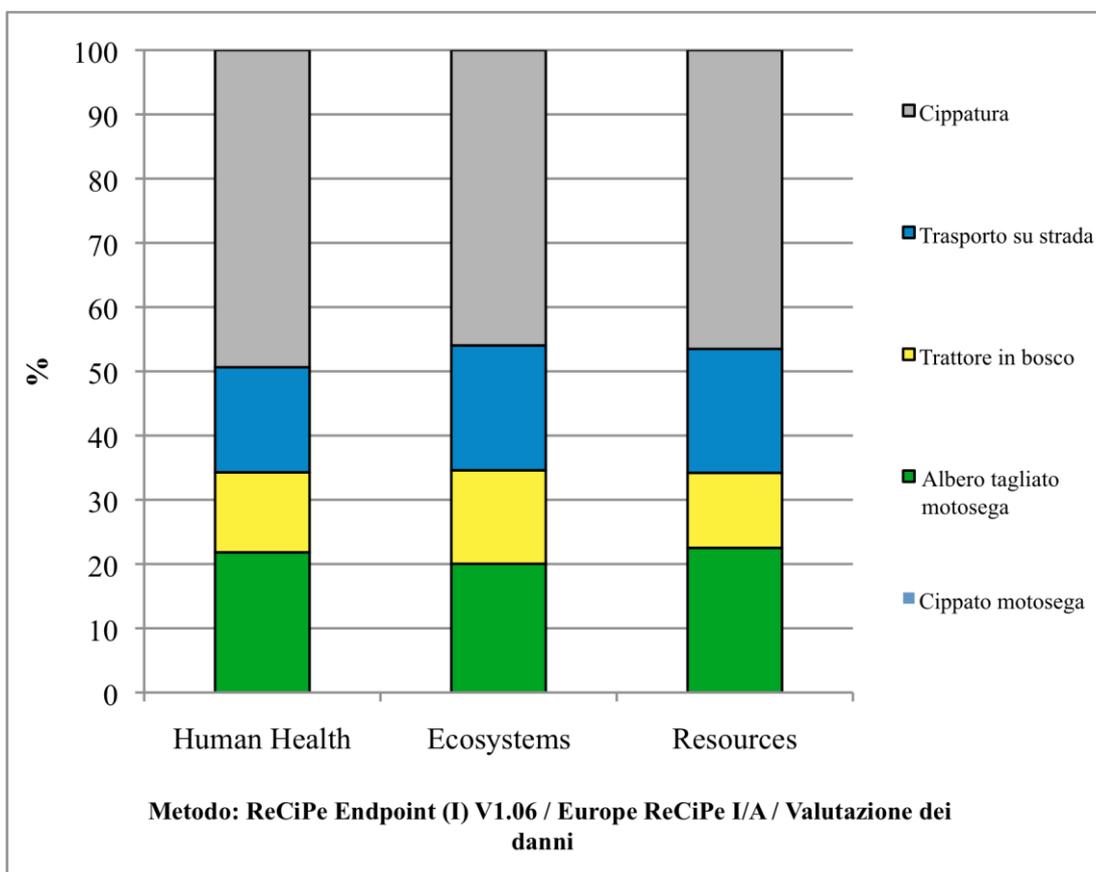


Fig 40 Valutazione dei danni della filiera legno-cippato tradizionale

Nello schema della filiera (figura 41) è stato riportato il contributo delle singole fasi alla definizione del punteggio totale dell'impatto, ottenuto con il metodo ReCiPe considerando tutte le categorie d'impatto. In particolare, viene evidenziato che la fase della filiera legno cippato tradizionale a maggior impatto ambientale risulta, come già evidenziato, la fase della cippatura, seguita dal taglio albero, dal trasporto su strada ed, infine, dal trasporto in bosco.

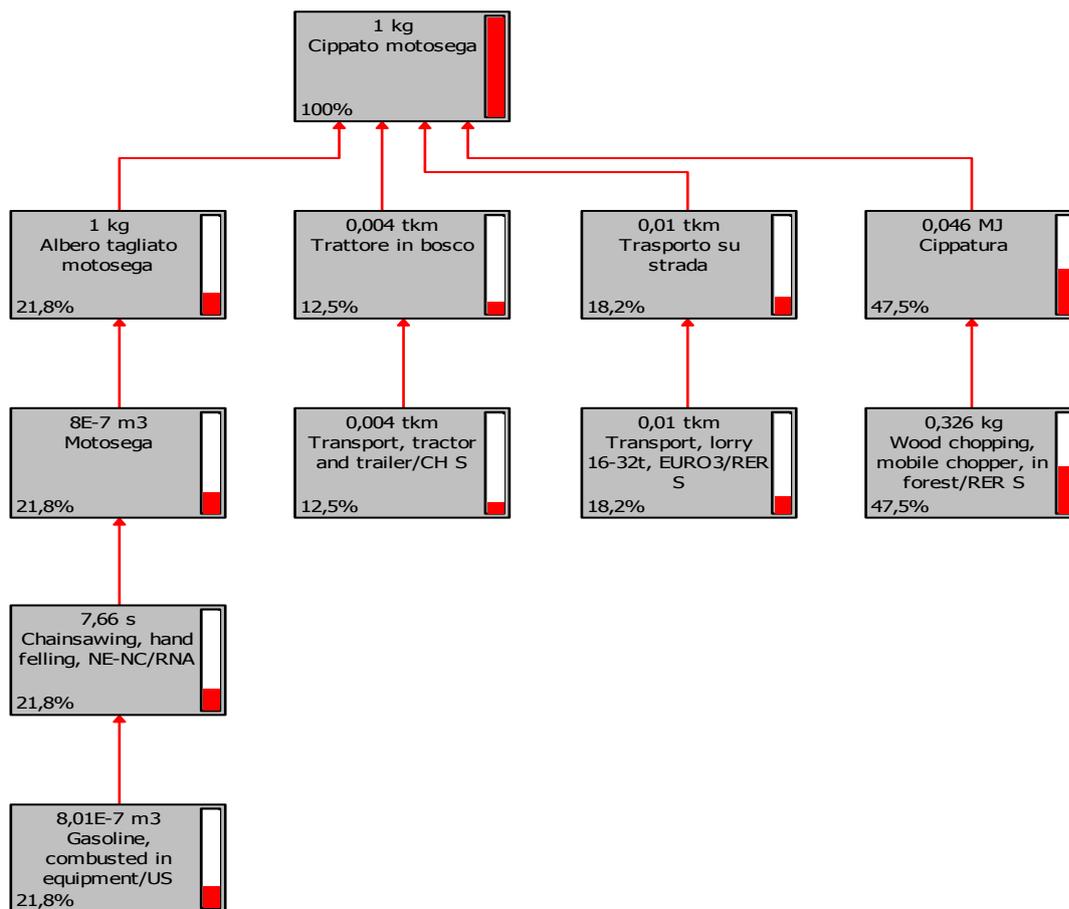


Fig 41. Schema della filiera legno-cippato tradizionale

4.2.5 Analisi LCA della filiera legno-cippato con processore

I risultati ottenuti dalla sperimentazione sono stati analizzati per definire l'entità degli impatti con cui ciascuna fase della filiera legno cippato innovativa contribuisce alla definizione del punteggio totale delle varie categorie di impatto, raggruppate nelle tre principali considerate nel metodo ReCiPe (tabella 18).

Dalla tabella, e in maniera più immediata dal diagramma (figura 42), è evidente che la fase di "taglio con processore" è impattante in misura uguale o addirittura superiore alla fase di "cippatura" per le categorie *Human toxicity*, *Photochemical oxidant formation*, *Particulate matter formation*, *Terrestrial acidification*, *Freshwater ecotoxicity*, *Marine ecotoxicity*, *Fossil depletion*; è invece meno impattante della fase "cippatura" per le categorie *Climate change Human Health e Ecosystem*, *Ozone depletion*, *Terrestrial ecotoxicity e Fossil depletion*, mentre non è impattante per altre

categorie quali *Ionising radiation, Freshwater eutrophication, Agricultural land occupation, Urban land occupation, Natural Land transformation, Metal depletion.*

Tab. 18 Caratterizzazione degli impatti ambientali e valutazione dei danni della filiera legno-cippato con processore (D=DALY; Sp.yr= specie per anno; \$=dollaro).

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Albero tagliato processore	Trattore in bosco	Trasporto su strada	Cippatura
Climate change Human Health	D	1,47 E-08	5,26 E-09	1,56 E-09	2,34 E-09	5,55 E-09
Ozone depletion	D	6,25 E-13	8,39 E-17	9,05 E-14	1,81 E-13	3,53 E-13
Human toxicity	D	2,48 E-10	1,14 E-10	2,33 E-11	3,11 E-11	7,95 E-11
Photochemical oxidant formation	D	6,38 E-12	3,05 E-12	4,09 E-13	6,04 E-13	2,31 E-12
Particulate matter formation	D	1,18 E-08	5,10 E-09	1,01 E-09	1,03 E-09	4,66 E-09
Ionising radiation	D	6,69 E-12	0	2,68 E-12	1,84 E-12	2,16 E-12
Human Health	D	2,68 E-08	1,04 E-08	2,60 E-09	3,42E-09	1,03 E-08
Climate change Ecosystems	Sp.yr	9,81 E-11	3,51 E-11	1,04 E-11	1,56 E-11	3,70 E-11
Terrestrial acidification	Sp.yr	1,34 E-13	6,39 E-14	9,49 E-15	1,27 E-14	4,80 E-14
Freshwater eutrophication	Sp.yr	3,56 E-14	0	1,30 E-14	6,73 E-15	1,57 E-14
Terrestrial ecotoxicity	Sp.yr	1,16 E-13	1,17 E-15	2,36 E-14	3,80 E-14	5,37 E-14
Freshwater ecotoxicity	Sp.yr	9,95 E-15	3,85 E-15	1,86 E-15	1,12 E-15	3,10 E-15
Marine ecotoxicity	Sp.yr	2,84 E-17	1,22 E-17	4,79 E-18	2,87 E-18	8,55 E-18
Agricultural land occupation	Sp.yr	1,09 E-12	0	9,93 E-13	3,61E-14	6,76 E-14
Urban land occupation	Sp.yr	1,29 E-12	0	7,85 E-13	3,39 E-13	1,67 E-13
Natural land transformation	Sp.yr	3,89 E-12	0	4,40 E-13	8,60 E-13	2,59 E-12
Ecosystems	Sp.yr	1,05 E-10	3,51 E-11	1,27E-11	1,69 E-11	4,00 E-11
Metal depletion	\$	5,39 E-05	0	1,56 E-05	5,66 E-06	3,27E-05
Fossil depletion	\$	0,03039	0,01063	0,00297	0,00492	0,01186
Resources	\$	0,03045	0,01063	0,00298	0,00493	0,01189

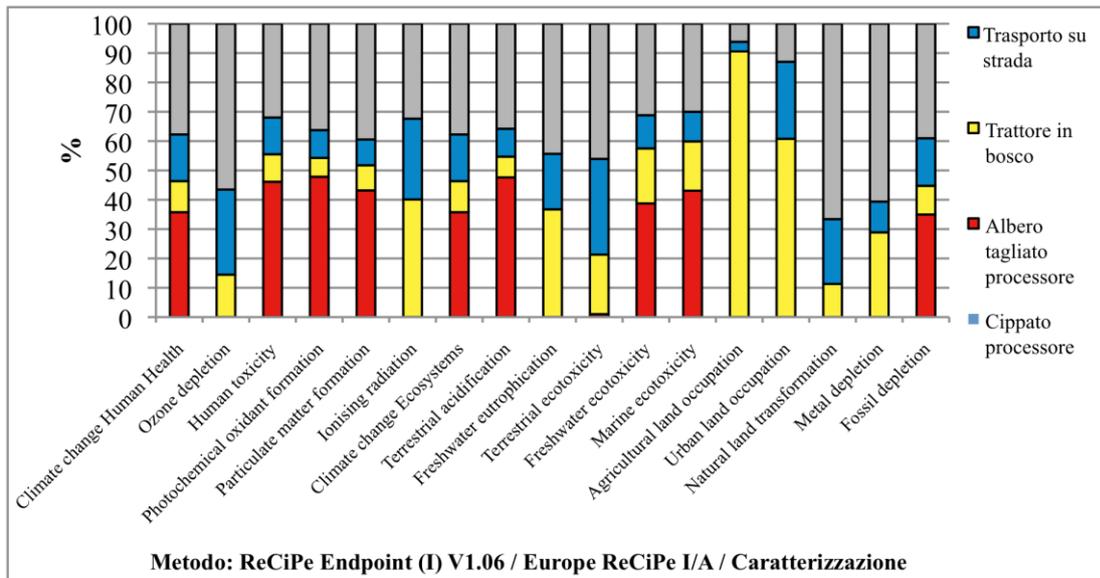


Fig. 42 Caratterizzazione degli impatti ambientali della filiera legno-cippato con processore

Dall'osservazione dei risultati riportati nel diagramma delle categorie di danno (figura 43) si è notato che la fase di taglio con processore è la fase che impatta maggiormente sulla salute umana, ed impatta poco meno (circa il 35%) della fase di cippatura sull'ecosistema e sulle risorse.

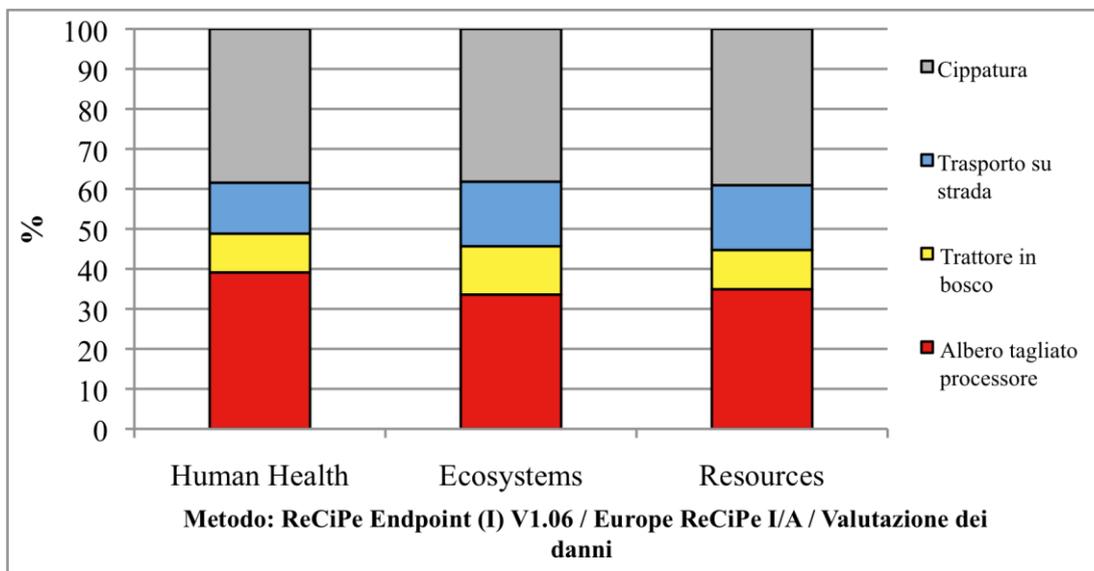


Fig.43 Valutazione dei danni della filiera legno-cippato con processore

Nello schema della filiera sottostante (figura 44) è riportato invece il contributo delle singole fasi alla definizione del punteggio totale dell'impatto; è evidente che l'impatto

complessivo della fase di taglio con processore (37%) è di poco inferiore a quello della cippatura (38,5%), considerata la fase più impattante nella filiera tradizionale.

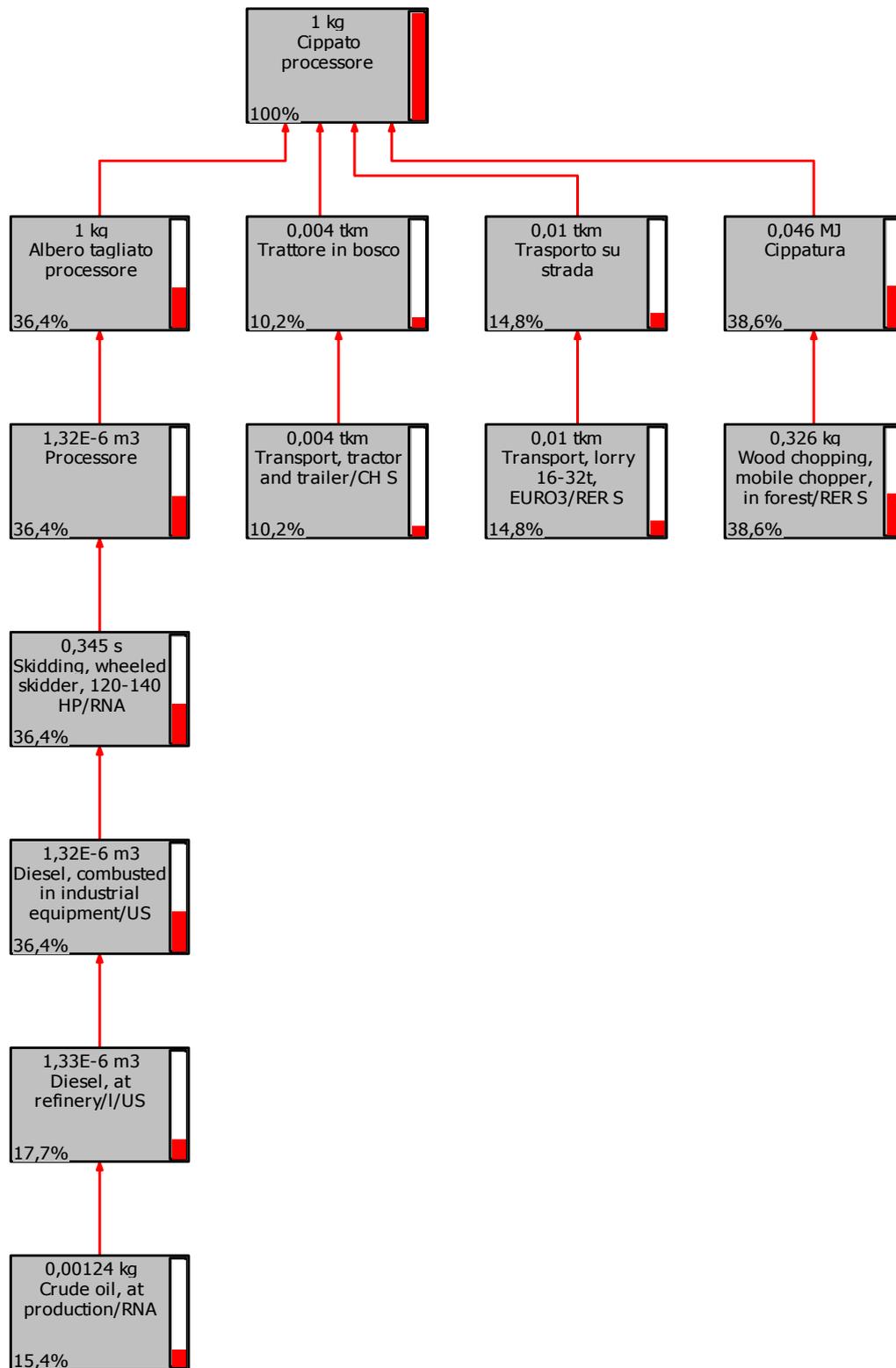


Fig.44. Schema della filiera legno-cippato con processore

4.2.6 Confronto analisi LCA filiera legno-cippato tradizionale ed innovativa

Dal confronto dell'analisi LCA fra la filiera legno cippato tradizionale e filiera con processore è emerso che gli impatti ambientali derivati dalla filiera innovativa sono uguali o superiori per tutte le categorie considerate (tabella 19).

Tab. 19 Confronto caratterizzazione degli impatti e valutazione dei danni tra le due filiere

Categoria d'impatto	Unità	Cippato motosega	Cippato processore
Climate change Human Health	DALY	1,20 E-08	1,47 E-08
Ozone depletion	DALY	6,25 E-13	6,25 E-13
Human toxicity	DALY	1,96 E-10	2,48 E-10
Photochemical oxidant formation	DALY	4,72 E-12	6,38 E-12
Particulate matter formation	DALY	8,60 E-09	1,18 E-08
Ionising radiation	DALY	6,69 E-12	6,69 E-12
Human Health	DALY	2,08 E-08	2,68 E-08
Climate change Ecosystems	species.yr	8,04 E-11	9,81 E-11
Terrestrial acidification	species.yr	9,67 E-14	1,34 E-13
Freshwater eutrophication	species.yr	3,56 E-14	3,56 E-14
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	1,16 E-13	1,16 E-13
Freshwater ecotoxicity	species.yr	8,18 E-15	9,95 E-15
Marine ecotoxicity	species.yr	2,28 E-17	2,84 E-17
Agricultural land occupation	species.yr	1,09 E-12	1,09 E-12
Urban land occupation	species.yr	1,29 E-12	1,29 E-12
Natural land transformation	species.yr	3,89 E-12	3,89 E-12
Ecosystems	species.yr	8,69 E-11	1,04 E-10
Metal depletion	\$	5,39 E-05	5,39 E-05
Fossil depletion	\$	0,02552	0,03039
Resources	\$	0,02557	0,03045

In particolare, si è notato che il taglio con motosega e con processore comportano gli impatti ambientali simili o uguali per le categorie *Ozone depletion*, *Ionising radiation*, *Freshwater eutrophication*, *Terrestrial ecotoxicity*, *Agricultural land occupation*, *Urban land occupation*, *Natural land transformation*, *Metal depletion*; per tutte le altre categorie di impatti considerate il processore è più impattante della motosega (figura 45).

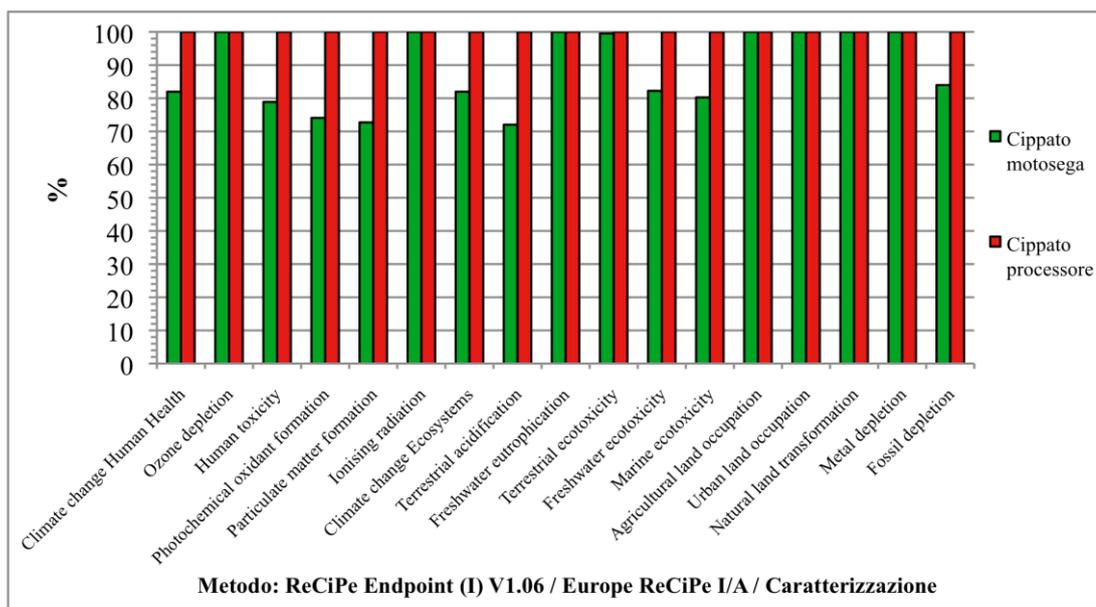


Fig. 45 Confronto caratterizzazione degli impatti tra le due filiere legno-cippato

Dall'analisi del diagramma della valutazione dei danni (figura 46) è risultato evidente che l'uso del processore è più impattante dell'uso della motosega su tutte e tre le categorie, con differenze di oltre il 20% sulla salute umana e di circa il 18-16% sull'ecosistema e sulle risorse.

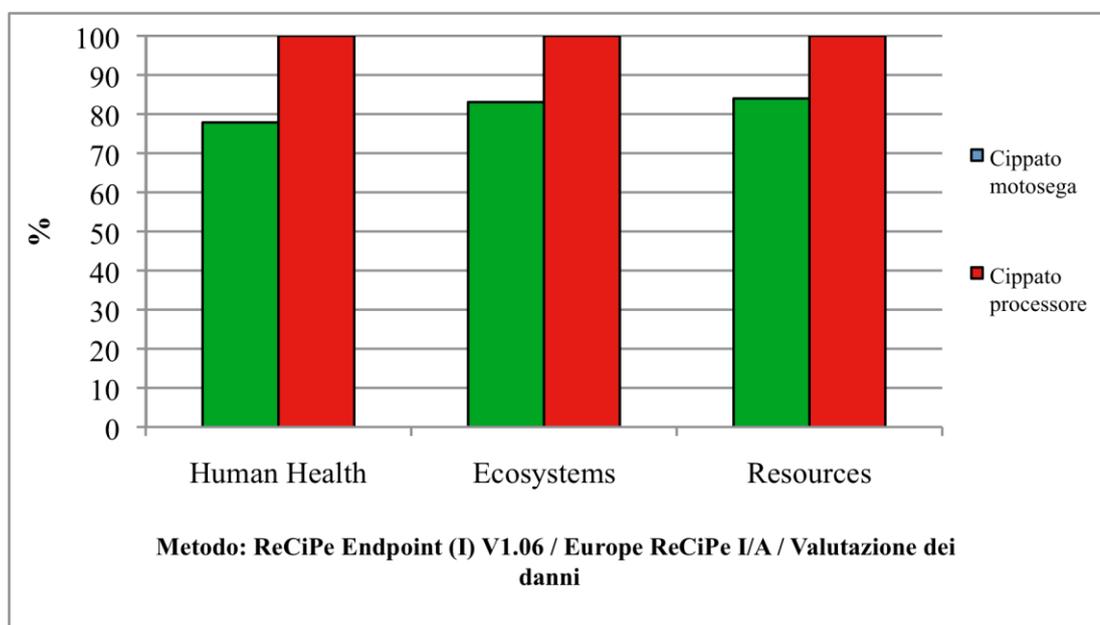


Fig. 46 Confronto della valutazione dei danni tra le due filiere legno-cippato

Normalizzando i dati si è notato (figura 47) che i maggiori impatti sono sulla disponibilità delle risorse mentre più contenuti sono i danni relativi la salute umana e molto contenuti quelli sull'ecosistema.

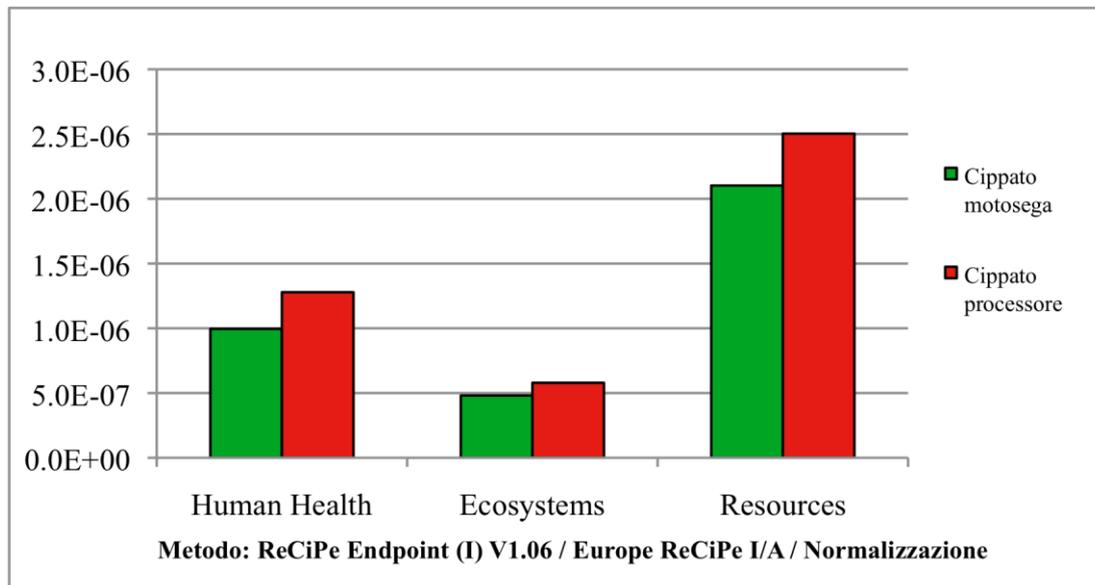


Fig. 47 Confronto normalizzazione dei danni tra le due filiere legno-cippato

4.3 – Analisi LCA con il metodo IPCC 2007

Il modello IPCC 2007 permette la valutazione dei cambiamenti climatici con un orizzonte temporale di 100 anni. I fattori di caratterizzazione sono espressi in una sola categoria di impatto, ovvero il potenziale riscaldamento dell'atmosfera, Global Warming Potential (GWP), in termini di incremento di CO₂equivalenti.

Con il modello IPCC 2007 sono stati determinati gli impatti della filiera energetica analizzata, e successivamente, sono stati messi a confronto con quella di riferimento.

E' stato, infine, analizzato in termini di GWP l'impatto della filiera legno-cippato svolta sia con metodo tradizionale (motosega) che con metodo innovativo (processore).

4.3.1 Analisi LCA della filiera legno-energia

Dalla tabella che segue (tabella 20), riportante i risultati dell'analisi LCA mediante metodo IPCC 2007, e dal relativo diagramma di caratterizzazione (figura 48) è risultato che nella filiera energetica l'impatto in termini di GWP è imputabile

principalmente al consumo di energia elettrica, seguito dal processo di produzione e trasporto del cippato in azienda agricola e dalla produzione ed uso della caldaia; lo smaltimento delle ceneri è invece poco rilevante mentre la combustione del cippato non comporta impatti sul potenziale di riscaldamento terrestre.

Tab.20. Caratterizzazione dell’impatto ambientale della filiera legno-energia (C = processo di combustione del cippato; S = smaltimento ceneri)

Categoria d’impatto	Unità	Totale	Cippato in azienda	Elettricità	Caldaia	C	S
IPCC GWP 100a	kg CO ₂ eq	0,003986	0,001066	0,002124	0,00075	0	4,52 E-05

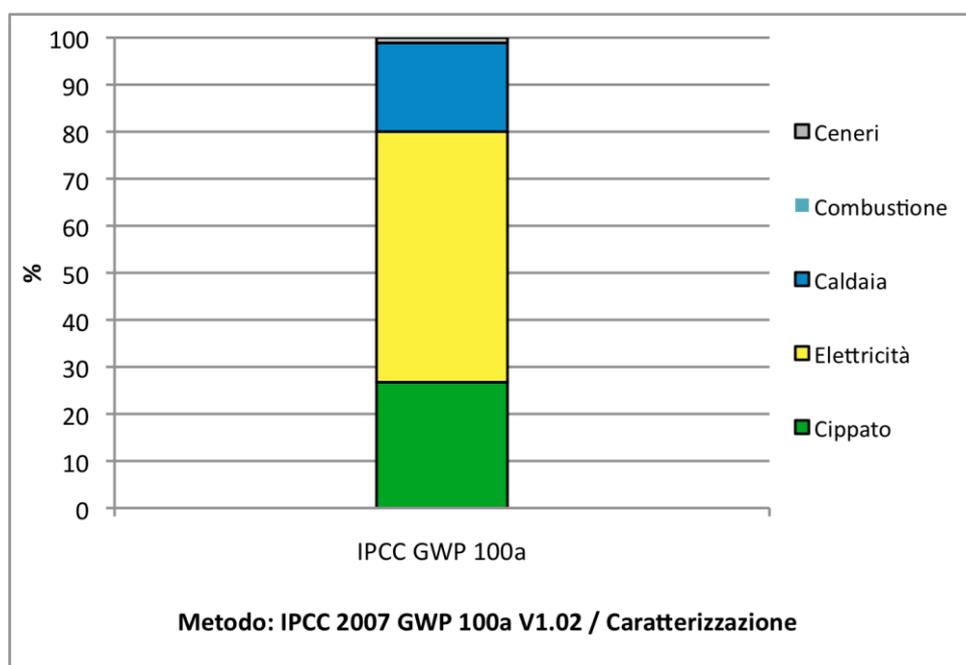


Fig. 48 Caratterizzazione dell’impatto ambientale della filiera legno-energia

Lo schema dell’intera filiera della figura 49 riporta in termini percentuali l’impatto di ciascun processo rispetto al complessivo. Il processo “combustione cippato” non è rappresentato perché non incide sull’intera filiera.

Il processo legato al consumo di energia elettrica impatta per oltre il 53% e, quindi, in misura superiore rispetto a quelli valutati con il metodo ReCiPe.

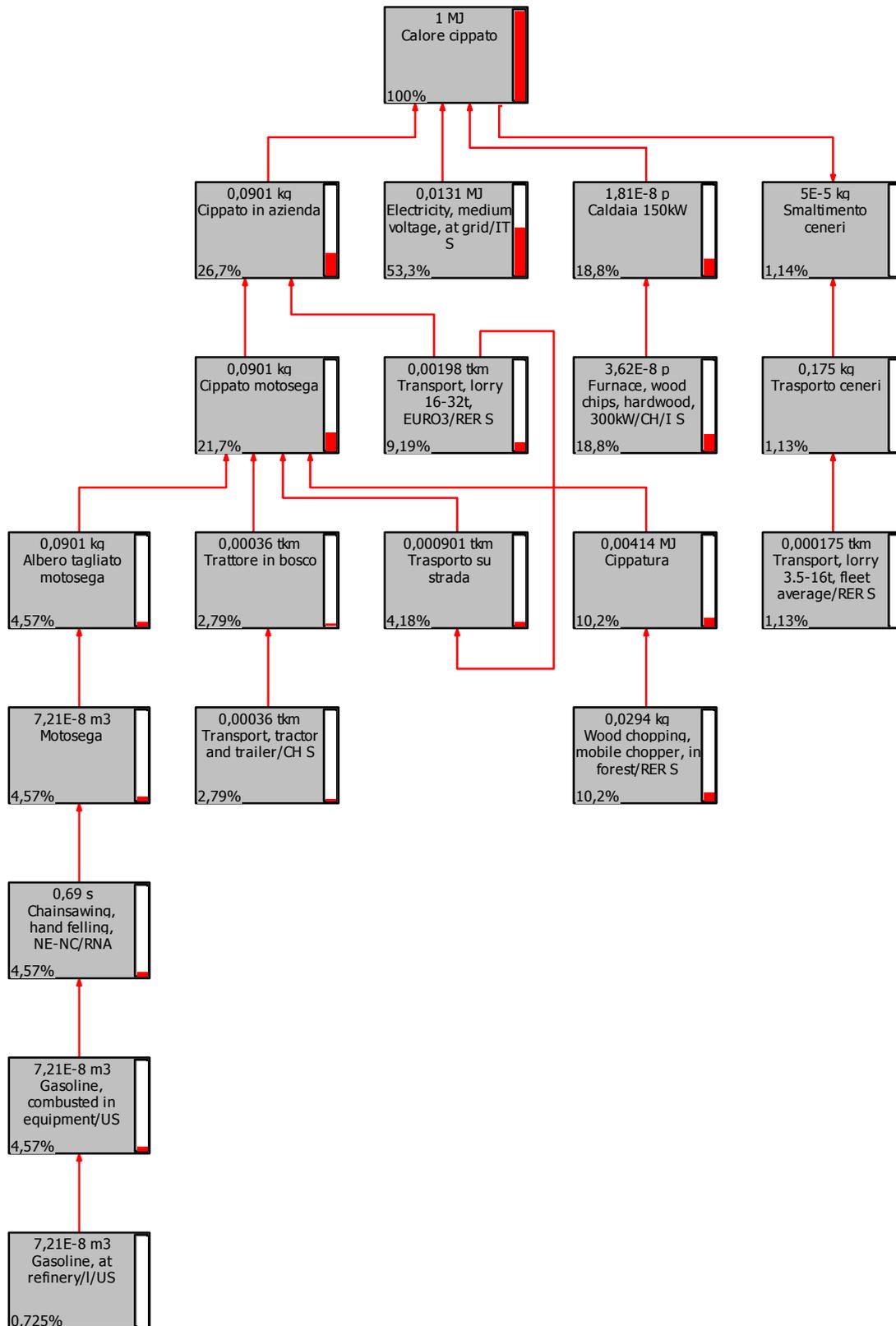


Fig. 49 Schema della filiera legno-energia

4.3.2 Analisi LCA della filiera di riferimento

Dai dati riportati i dati in tabella 21, nel diagramma della figura 50 e nello schema della figura 51, per la filiera di riferimento, si evince che in termini di GWP la combustione del combustibile fossile ha un impatto prevalente, in misura dell'84%, e la fornitura del gasolio del 13,2%. Gli altri processi, tra cui il consumo di energia elettrica (2,3%), sono decisamente poco impattanti e nel loro complesso hanno inciso per meno del 3%.

Tab. 21 Caratterizzazione dell' impatto ambientale della filiera di riferimento (C = combustione)

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Gasolio	Elettricità	Caldaia	Trasporto	C
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	0,10441	0,01381	0,002124	0,000642	0,0001385	0,0877

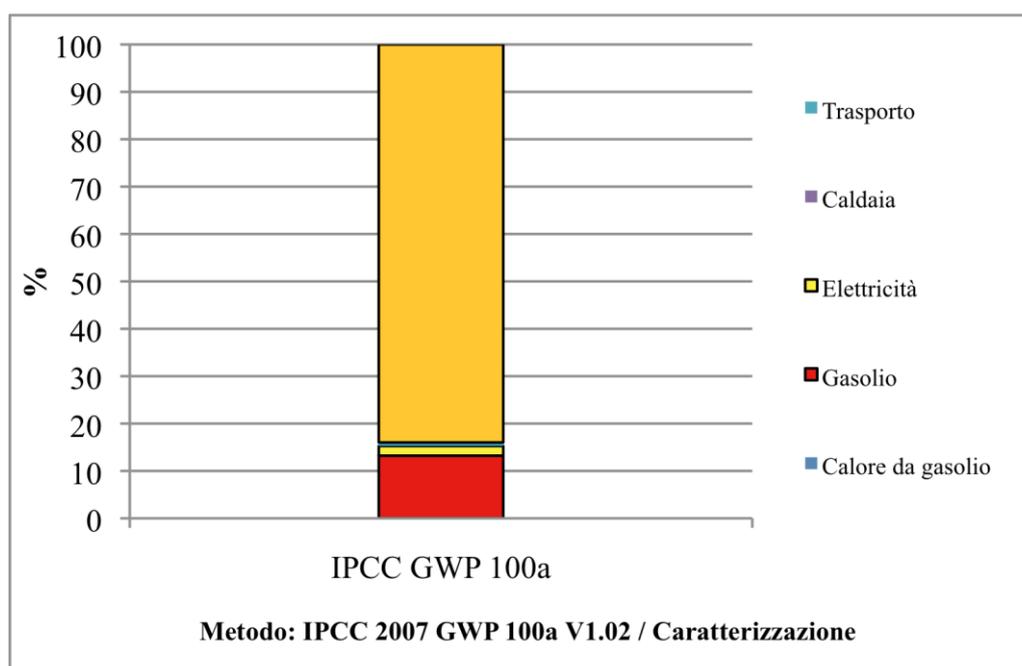


Fig. 50 Caratterizzazione dell' impatto ambientale della filiera di riferimento

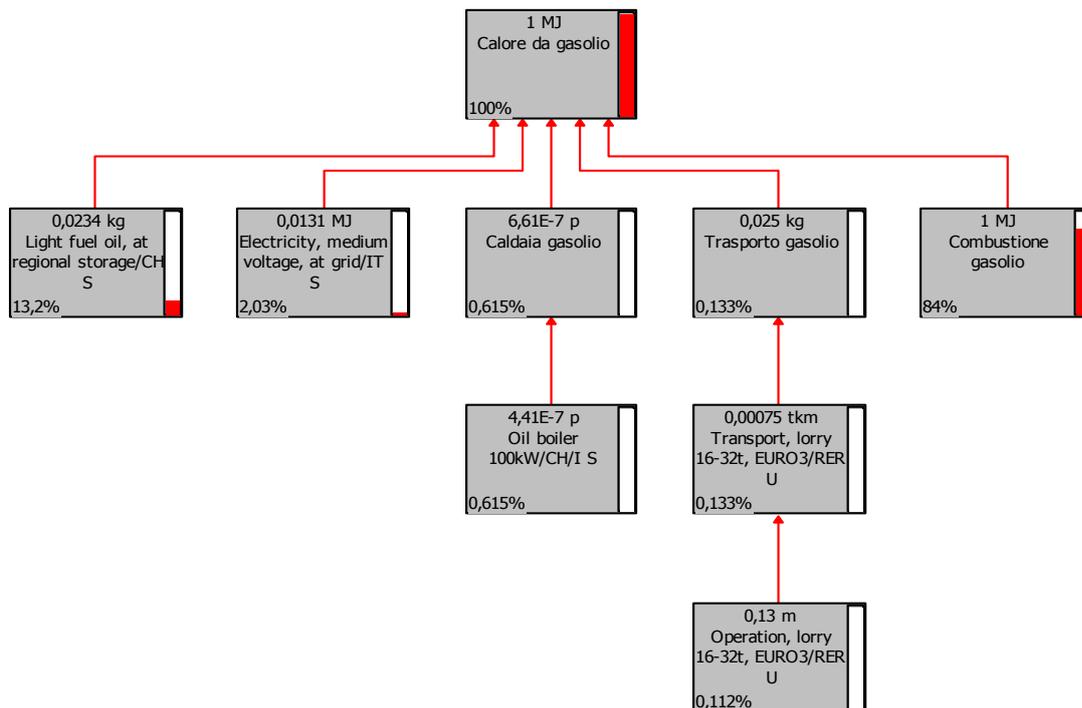


Fig. 51 Schema della filiera di riferimento

4.3.3 Confronto analisi LCA tra filiera legno-energia e quella di riferimento

Dal confronto tra le filiere energetiche legno-energia e a gasolio si è evidenziato (tabella 22 e figura 51), che la filiera ad energia rinnovabile ha un impatto, in termini di potenziale di riscaldamento terrestre, notevolmente inferiore rispetto a quella a gasolio.

Ciò è essenzialmente dovuto a due motivi. Il primo è che la CO₂ generata dalla combustione del cippato è considerata completamente rinnovabile perché compensata dalla CO₂ assorbita dalla pianta durante la crescita (il ciclo della CO₂ della biomassa può dunque ritenersi chiuso ma alla condizione che il ritmo di impiego di questa risorsa non superi la capacità di rigenerazione della stessa) e per questo nel grafico è stata completamente trascurata. Tuttavia, occorre considerare che il bilancio delle emissioni non può essere considerato nullo perché intervengono le emissioni legate alla produzione del cippato e le emissioni di gas ad effetto serra differenti dall'anidride carbonica (ossidi di azoto e di zolfo, ossido di carbonio, gas volatili) che

si sviluppano durante il processo di combustione del cippato. Il secondo motivo è che la filiera rinnovabile richiede un ridotto utilizzo di input “industriali” per la produzione del combustibile cippato mentre per il gasolio pesano molto le fasi di raffinazione. Inoltre, essendo quella a cippato una filiera corta, con distanza di 12 km fra il punto di produzione del combustibile e quello della sua utilizzazione, gli impatti legati al trasporto sono molto ridotti.

Tab. 22 Confronto dell’impatto ambientale tra le due filiere

Categoria d’impatto	Unità	Calore cippato	Calore da gasolio
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	0,003985711	0,104413181

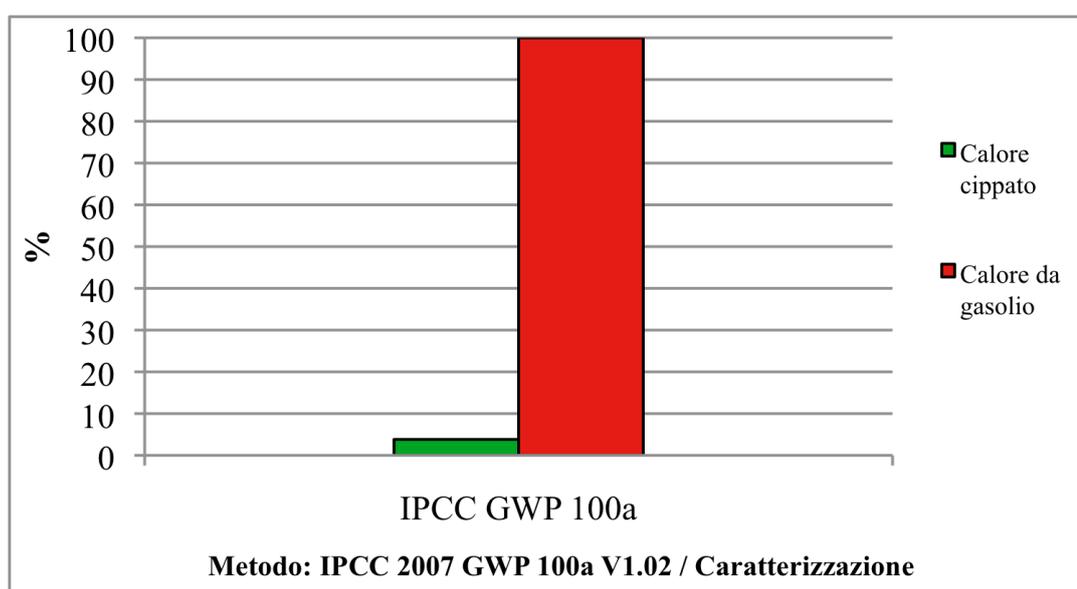


Fig. 51 Confronto dell’ impatto ambientale tra le due filiere

4.3.4 Analisi LCA della filiera legno-cippato tradizionale

Dai dati riportati in tabella 23, quelli del diagramma di caratterizzazione della figura 52 e quelli dello schema della filiera legno cippato della figura 53 è evidente che la fase maggiormente impattante è quella della cippatura (46,9%), seguita dal taglio dell’albero (21%), dal trasporto e dall’esbosco.

Tab. 23 Valutazione dell’impatto ambientale della filiera legno-cippato tradizionale

Categoria d’impatto	Unità	Totale	Albero tagliato motosega	Trattore in bosco	Trasporto su strada	Cippatura
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	0,00961	0,002023	0,00123565	0,0018469	0,0045073

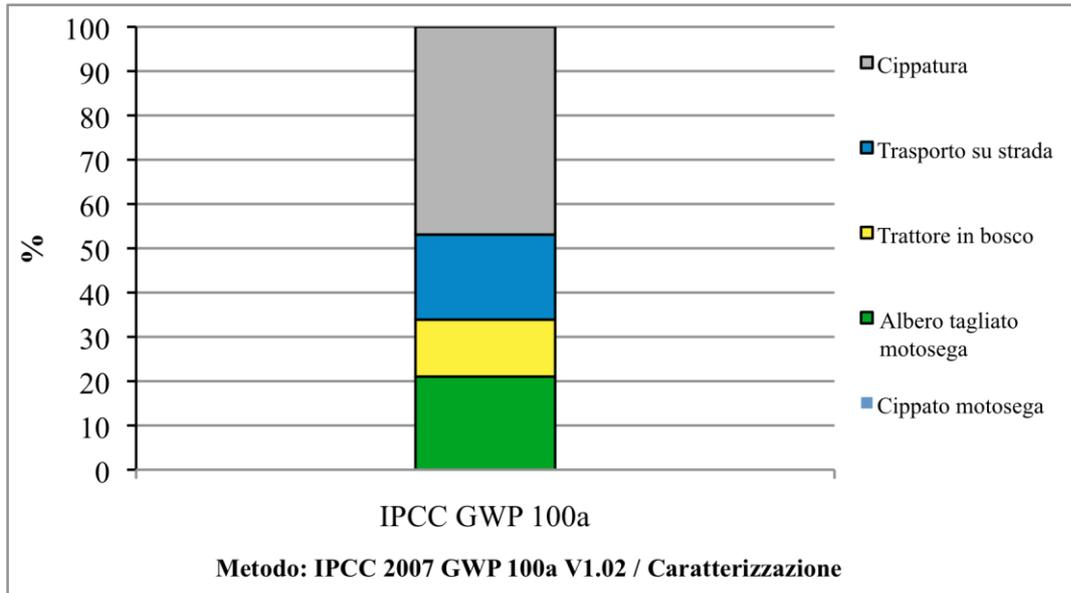


Fig. 52 Valutazione dell'impatto ambientale della filiera legno-cippato tradizionale

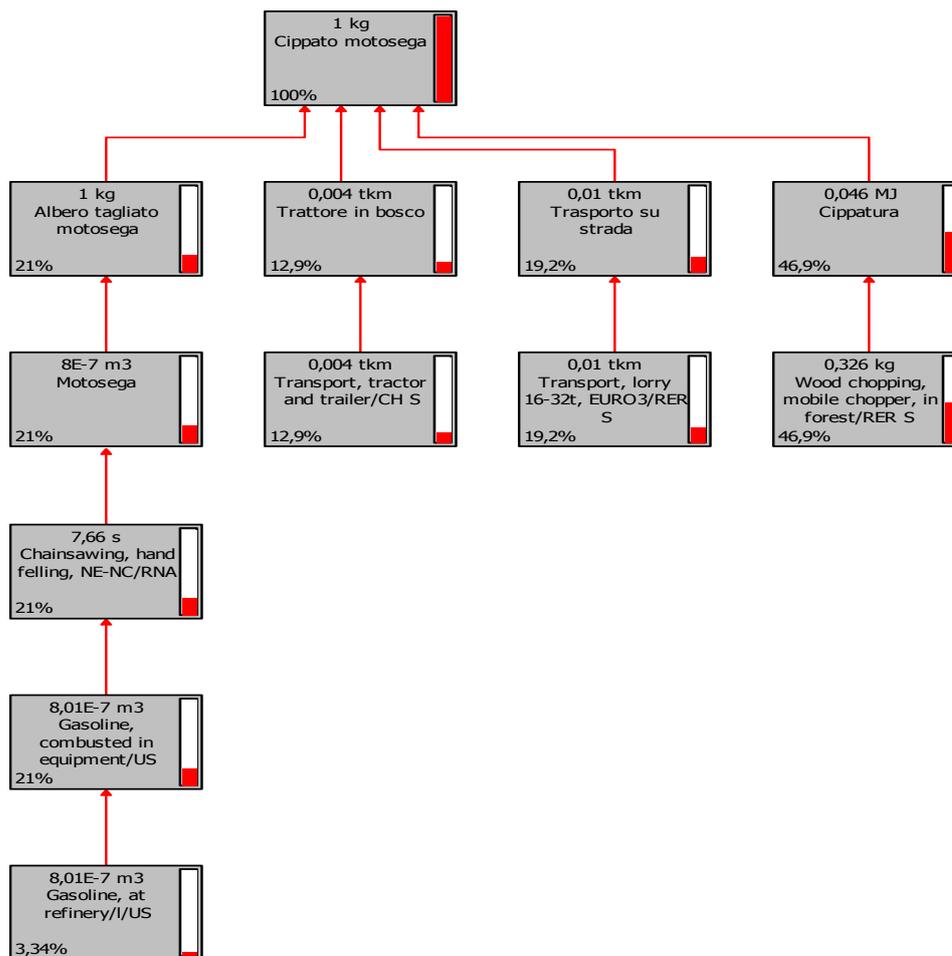


Fig. 53. Schema della filiera legno-cippato tradizionale

4.3.5 Analisi LCA della filiera legno-cippato con processore

Dall'analisi dei risultati degli impatti in GWP della filiera con processore (tabella 24, figura 54 e figura 55) risulta evidente che la fase di abbattimento delle piante meccanizzata è leggermente meno impattante (35%) di quella della cippatura. La fase di esbosco è meno impattante rispetto alla filiera tradizionale ma ciò, come vedremo dal confronto, non riesce complessivamente a contenere i maggiori impatti.

Tab. 24 Valutazione dell'impatto ambientale della filiera legno-cippato con processore

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Albero tagliato processore	Trattore in bosco	Trasporto su strada	Cippatura
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	0,011754	0,00416411	0,0012357	0,0018469	0,004507294

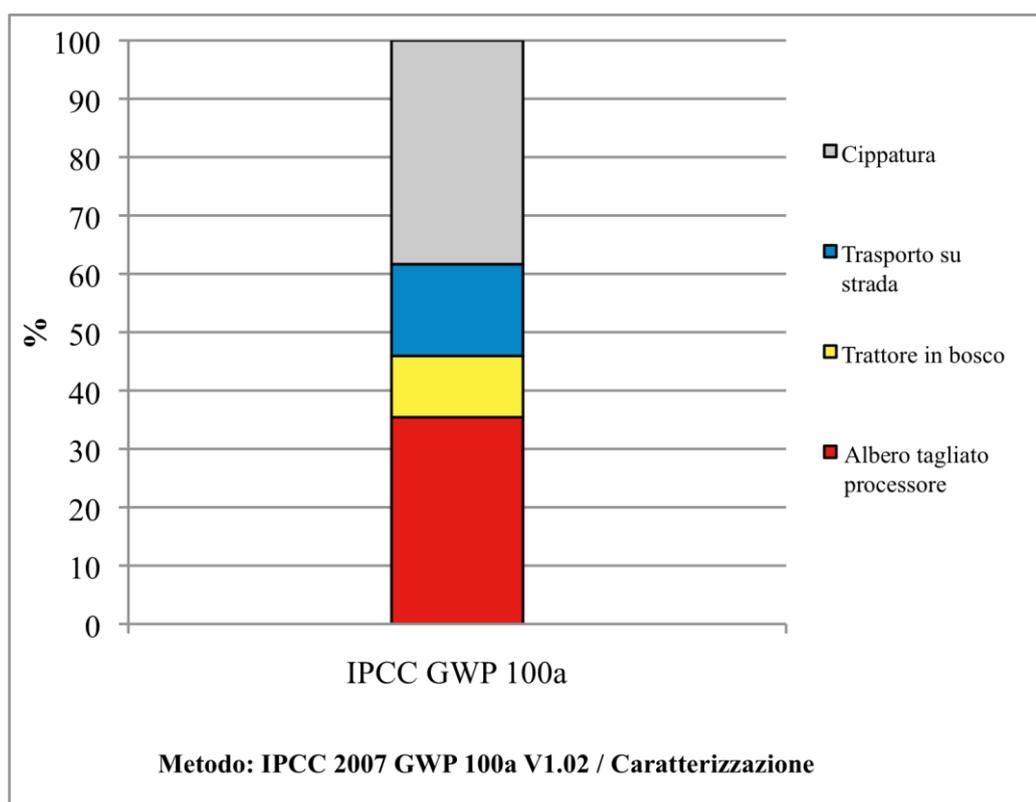


Fig. 54 Valutazione dell'impatto ambientale della filiera legno-cippato con processore

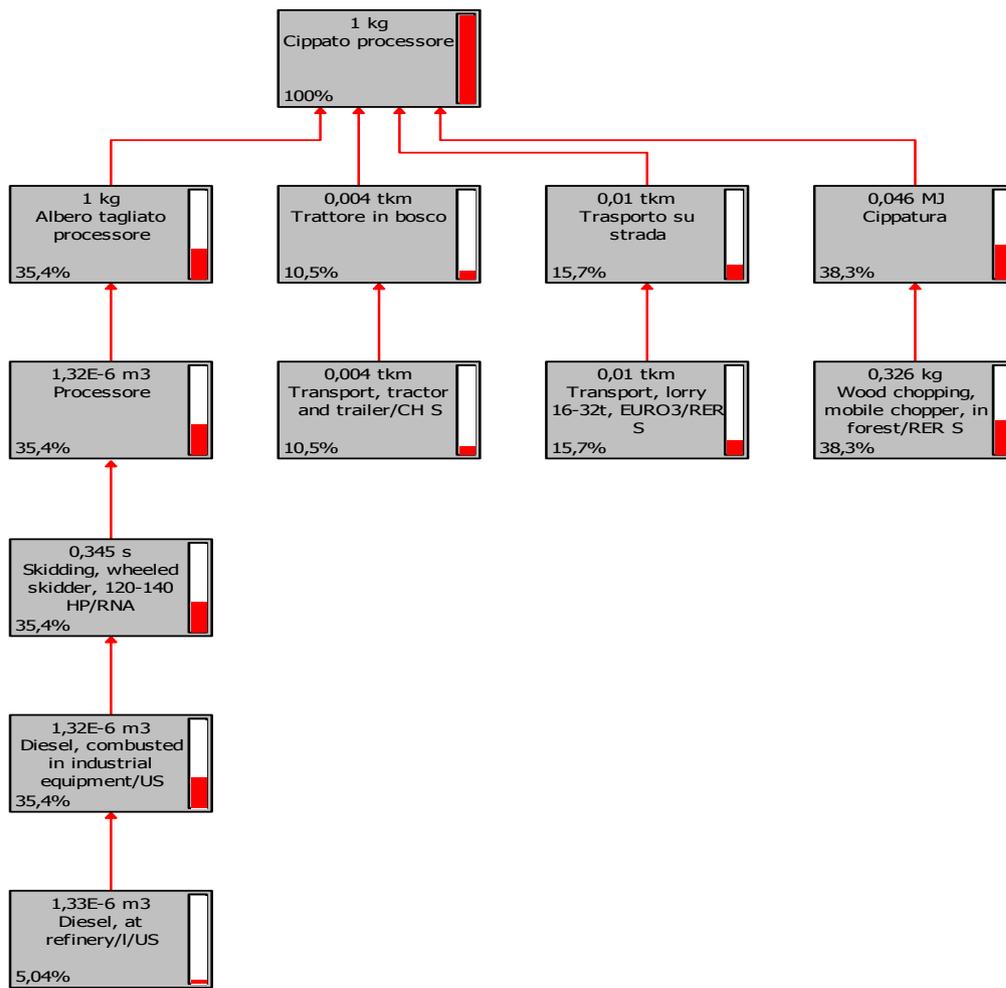


Fig. 55. Schema della filiera legno-cippato con processore

4.3.6 Confronto analisi LCA tra la filiera legno-cippato tradizionale ed innovativa

Dal confronto tra i due sistemi di taglio è evidente che l'introduzione della meccanizzazione nel caso studio comporta maggiori impatti; è, infatti, risultato che l'uso del processore impatta per circa il 18% in più rispetto all'uso delle motoseghe (tabella 25 e figura 56).

Solo con produttività maggiori il processore, in termini di GWP, può comportare impatti pari o, addirittura, inferiori rispetto al cantiere con motoseghe.

Tab. 25 Confronto della valutazione dell'impatto ambientale tra le due filiere

Categoria d'impatto	Unità	Cippato motosega	Cippato processore
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	0,009612845	0,011753959

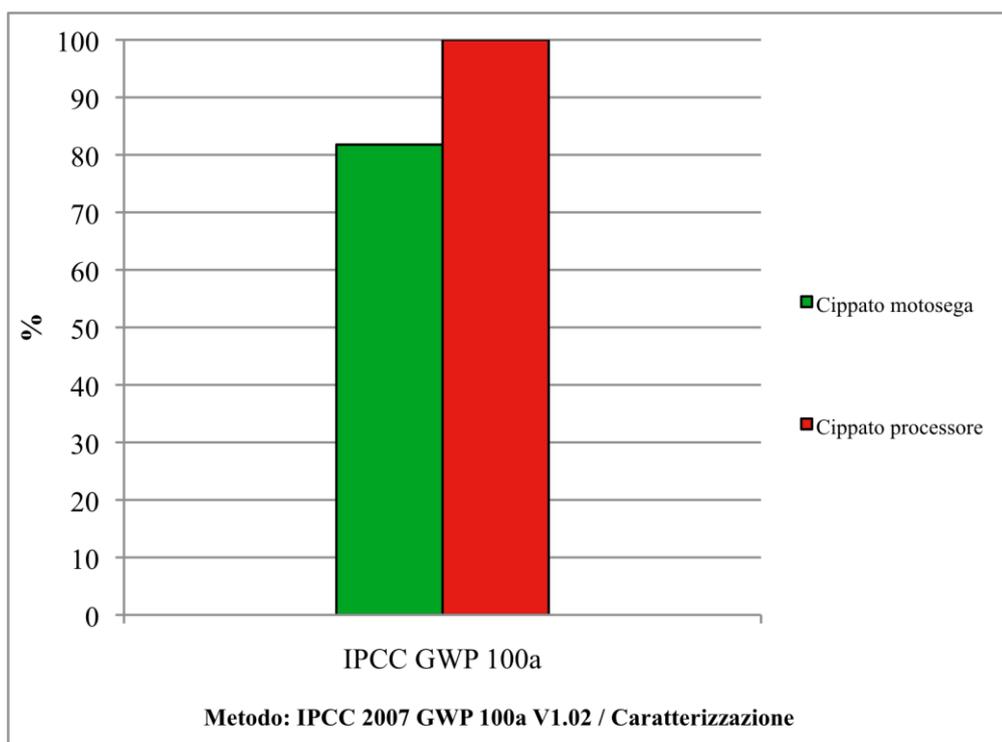


Fig. 56 Confronto valutazione dell' impatto ambientale tra le due filiere

5. Conclusioni

Lo studio ha analizzato i carichi ambientali, attraverso metodologia LCA, di una filiera legno energia locale e corta dell'Alto Mugello e la sua sostenibilità rispetto alla filiera energetica di riferimento a combustibili fossili. Inoltre, è stata valutata, sempre da un punto di vista ambientale, l'introduzione di un aspetto innovativo nella fase di taglio delle piante con l'uso di un processore. Per le analisi LCA è stato impiegato il software SimaPro7.3 ed i metodi applicati sono stati ReCiPe e IPCC2007.

La prima parte dello studio ha riguardato la definizione della filiera energetica, nelle sue diverse fasi, tenendo conto degli obiettivi della ricerca, del campo di applicazione dell'analisi LCA (unità funzionale, confini di sistema, periodo di riferimento e qualità dei dati) nonché delle esigenze territoriali (introduzione della meccanizzazione nei diradamenti delle faggete) e aziendali (progettazione, realizzazione e sperimentazione di un impianto termico plurifunzionale). In questo processo sono state coinvolte imprese private locali (agricole, forestali e artigianali) e nazionali (Newcomen, Agritech, Euroagrar), enti locali (GAL Start, Unione Montana dei Comuni del Mugello) ed enti di ricerca (Fondazione per il Clima e la Sostenibilità).

La filiera così definita è stata analizzata nei suoi principali processi: produzione di cippato (taglio dell'albero, esbosco, cippatura e trasporto del cippato in azienda), consumo di energia elettrica (legato al funzionamento delle varie parti dell'impianto termico), produzione caldaia, combustione cippato, smaltimento ceneri.

In generale, è stato evidenziato che il processo maggiormente impattante è quello legato al consumo di energia elettrica, per diverse categorie di impatti (mid point): cambiamenti climatici, riduzione di ozono, formazione radiazioni ionizzanti, eutrofizzazione, ecotossicità acque dolci e marine, riduzione delle risorse fossili. Il processo di combustione del cippato è risultato, invece, maggiormente impattante su tre categorie: formazione di particolato, formazione fotochimica di ossidanti e acidificazione terrestre. Infine, il processo di produzione e trasporto di cippato in azienda ha impattato sulle varie categorie in misura variabile, tra circa il 10 e il 30% sul totale, con punte superiori per ecotossicità terrestre e occupazione di terreno agricolo.

Dalla valutazione dei danni (end point) è emerso che il processo di combustione del cippato è quello maggiormente impattante sulla salute umana, mentre il consumo di

elettricità è più rilevante sia in termini di qualità dell'ecosistema sia in termini di disponibilità delle risorse.

Rispetto alla filiera di riferimento a gasolio, quella a cippato impatta per circa il 5% su alcune categorie (cambiamenti climatici, riduzione di ozono, ecotossicità terrestre e diminuzione di combustibili fossili) e tra circa il 15-20% per tutte le altre.

In termini di valutazione dei danni, è risultato evidente che la filiera a combustibili fossili comporta carichi ambientali maggiori, rispetto a quella rinnovabile, sulla salute umana per circa il 88% e per il 95% sulla qualità dell'ecosistema e sulla disponibilità delle risorse.

Per il potenziale di riscaldamento terrestre, nella filiera rinnovabile, il processo maggiormente impattante è imputabile al consumo di energia elettrica, seguito dal processo di produzione e trasporto del cippato in azienda. In termini di GWP non influisce, invece, il processo di combustione del cippato essendo neutro il bilancio tra la produzione di CO₂ emessa durante la combustione e quella riassorbita durante la crescita delle piante.

I risultati indicano quindi che anche la filiera rinnovabile comporta carichi ambientali, ma in misura decisamente inferiore rispetto alla filiera tradizionale.

In sintesi, è possibile affermare che:

- il processo legato al consumo di energia elettrica è maggiormente impattante sulla qualità dell'ecosistema e sulla disponibilità delle risorse; il processo di combustione del cippato comporta i maggiori carichi sulle categorie di impatto che causano danni alla salute umana;
- il processo di produzione del cippato e il suo trasporto in azienda incide sull'intera filiera, in termini di impatti, per il 20% a fronte del 33% del consumo di elettricità e del 35% del processo combustione cippato;
- la fase a maggior impatto ambientale nella filiera legno cippato è la cippatura;
- la filiera rinnovabile rispetto a quella a combustibili fossili comporta impatti ambientali inferiori del 95% sulle macro categorie di danni qualità ecosistema e disponibilità delle risorse e del 90% su salute umana;
- in termini di GWP la filiera legno-energia comporta emissioni di circa il 5% rispetto alla filiera di riferimento; le emissioni GWP sono imputabili principalmente al consumo di energia elettrica, e secondariamente al processo di produzione cippato e produzione caldaia.

I risultati dell'analisi LCA del presente studio sono stati oggetto di valutazione critica da parte dell'Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA).

Dal confronto tra sistema di taglio tradizionale e sistema di taglio con uso del processore, è emerso che la filiera innovativa è maggiormente impattante, sia in termini di valutazione dei danni sulle tre macrocategorie (salute umana, qualità dell'ecosistema e disponibilità delle risorse) del metodo ReCiPe, sia in termini di potenziale riscaldamento terrestre del metodo IPCC2007.

Questo può essere spiegato tenendo conto che, gli elevati consumi di combustibili dell'escavatore, su cui è montato il processore, non hanno riscontro sulla sua produttività nel contesto analizzato, caratterizzato da sesti di impianto non regolari (si tratta infatti di faggete naturali) e da operazioni colturali, come i diradamenti, per le quali è richiesto un avanzamento non lineare.

L'analisi svolta ha evidenziato varie prospettive e strategie per il miglioramento della filiera analizzata che richiedono comunque ulteriori studi. Sul processo di combustione sarebbe interessante si potrebbe approfondire fundamentalmente due aspetti:

- ✓ l'utilizzo di cippato con umidità inferiore rispetto a quella media del 20% mediante il perfezionamento dell' essiccazione e dello stoccaggio in azienda, che comporta un aumento di efficienza d'uso dell'energia sviluppata durante la combustione;
- ✓ la gestione ottimale della moderna caldaia di combustione per mantenere il fattore di emissione ai minimi livelli (manutenzione filtri, controllo automatico delle temperature di combustione ecc..) anche attraverso formazione tecnica del personale aziendale incaricato al controllo.

Sui consumi di energia, una prospettiva interessante può essere quella legata all'impiego di un microgeneratore temo-elettrico. Questa tipologia di impianti utilizza il calore generato dalla combustione del cippato per produrre energia elettrica che può essere immessa nella rete aziendale e prevede il recupero del calore per le utenze termiche. Attualmente tali sistemi esistono solo allo stato prototipale. Nello studio è stata inizialmente svolta un'analisi preliminare dell'impatto di un sistema microgenerativo ad ORC di 3 kW_e, considerandole emissioni di gas serra evitate

grazie al suo impiego, impiegando i dati di riferimento rilevati in officina. Da una prima analisi è stato evidenziato che l'utilizzo del cogeneratore è in grado di abbattere totalmente le emissioni di gas serra della filiera analizzata andando a creare addirittura un "credito" ossia dei valori negativi in termini di GWP (0,00399 kg di CO₂ equivalente emessa per 1 MJ prodotto con filiera senza cogenerazione a -0,00010439 kg di CO₂ equivalente emessa per 1 MJ prodotto con filiera con cogenerazione).

Questi risultati preliminari, incoraggiano la sperimentazione di tale sistema, anche se ancora a livello prototipale, e stimolano ulteriori approfondimenti volti alla realizzazione di un sistema virtuoso in termini di sostenibilità ambientale.

Interessanti sembrano essere anche i vantaggi in termini economici dell'uso del cogeneratore, soprattutto in un contesto aziendale dove a fronte dei ricavi della messa in rete della corrente elettrica prodotta ed il recupero di energia termica per utilizzazioni aziendali, possono essere contenuti i costi della produzione del cippato (filiera corta, organizzazione e logistica produzione ed utilizzazione cippato, ecc.).

Per quanto riguarda il sistema di taglio, sarebbe interessante verificare, invece come possibile strategia di miglioramento, l'uso del processore in diradamenti di faggete con sesti di impianto regolari, l'inserimento del processore in una utilizzazione del cantiere mista (processore e taglio con motosega), per contenere gli spostamenti più difficoltosi, e l'impiego in aree sperimentali più ampie.

Inoltre, per una valutazione completa dell'operazione sarebbe opportuno tenere presente anche i vantaggi, in termini ambientali, derivanti dalla possibilità di reintrodurre i diradamenti delle faggete ad oggi quasi abbandonati per questioni di sostenibilità economica. In effetti, una regolare pratica dei diradamenti, oltre a influire positivamente sulla qualità finale del legno, favorisce anche un buon governo del bosco in termini di prevenzione incendi e di sicurezza.

Infine, possiamo dire che la filiera energetica oggetto di studio ha suscitato interesse, soprattutto, alle imprese forestali e zootecniche ma anche a quelle artigianali locali.

Le aziende forestali sono interessate sia ai risultati dell'uso del processore sia per la possibilità di valorizzare il cippato mediante filiera corta e locale. Le aziende zootecniche sono interessate, soprattutto, all'innovazione territoriale apportata con il sistema di essiccazione del foraggio che ha contribuito a risolvere alcuni problemi della fienagione e a migliorare la qualità dei foraggi con ripercussioni sulla qualità del latte prodotto e sullo stato sanitario degli animali. Le imprese artigianali, infine,

pongono particolare interesse al sistema microgenerativo poiché un suo sviluppo potrebbe comportare una nuova prospettiva di sviluppo per il settore.

La filiera legno energia oggetto dello studio potrebbe, in effetti, essere replicata in maniera capillare sia nel territorio del Mugello sia in territori simili, contribuendo così alla promozione di processi produttivi sostenibili nonché alla dinamicità e competitività del settore. Così, dopo la fase di promozione e incentivazione dell'innovazione proposta da parte del GAL Start e dell'Unione Montana dei Comuni del Mugello, ora risulta parimenti fondamentale il loro ruolo nella diffusione delle soluzioni proposte al fine di valorizzarle e di creare le basi per la sostenibilità ambientale, sociale ed economica del territorio.

BIBLIOGRAFIA

AAVV, 2009. La filiera legno energia come strumento di valorizzazione delle biomasse legnose agroforestali. Risultati del progetto Interregionale Woodland energy, pag 20-31, 2009.

Agenzia nazionale per la protezione dell'ambiente, 2001. Linee guida per la dichiarazione ambientale del prodotto (EDP).

APAT, 2003. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. Rapporti.

Arrhenius, 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Extract from a paper presented to the Royal Swedish Accademy of Scienze, 11° December 1895. Philosophical magazine, 41, 237-276.

Arsia, 2009. Agenzia Regionale Sviluppo e Innovazione nel Settore Agricolo forestale. Analisi dell'andamento meteorologico nell'annata 2009 in Toscana.

Baldo G.L., Marino M., Rossi S., 2008. Analisi del Ciclo di Vita LCA. Edizioni Ambiente.

Bayrak M., Gungor A., 2010. Fossil fuel sustainability: exergy assessment of a cogeneration system. Inter. J. Energy Res., 35, 162-168.

Bartolini G., Morabito M., Crisci A., Grifoni D., Torrigiani T., Petralli M., Maracchi G., Orlandini S. (2008). Recent trends in Tuscany (Italy) summer temperature and indices of extremes. International Journal of Climatology, 28 (13),1751-1760.

Bartolini G., Di Stefano V., Maracchi G., Orlandini S. (2011). Mediterranean warming is especially due to summer season. Evidences from Tuscany (central Italy). Theoretical Applied Climatology, DOI 10.1007/s00704-011-0481.

Berger M., Finkbeiner M., 2011. Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use. *J Life Cycle assessment*, Volume 16, Issue 1, 74-81.

Berti S., Piegai F., Verani S., 1989. Quaderni dell'Istituto di assestamento e tecnologia forestale. Università degli Studi di Firenze, Facoltà di agraria, Istituto di Assestamento e tecnologia forestale, fascicolo IV.

Blengini G.A, Busto M., 2009. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management system in Vercelli (Italy). *Journal of Environmental Management*, 90, 512-522.

Boustead I., 1996. LCA. How It came about, the beginning in the UK, v.1, n°3, 147-150.

Boustead I., Hancock G., 1979. *Handbook of Industrial Energy Analysis*, The open University, Milton Keynes, Hellis Horwood Limited, Chichester, West Sussex; England.

Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T., 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int. J. Climatol.*, 26, 345-381.

Camera dei Deputati, 2006. Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n° 152. Norme in materia ambientale, art. 3-quater.

Canals L.M., Burnip G.M., Cowell S.J., 2006. Evaluation of the environmental impacts of apple production using Life Cycle Assessment (LCA): case studio in New Zealand. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 114, 226-238.

Chiaromonte D., Recchia L., 2010. Is life cycle assessment (LCA) a suitable method for quantitative CO₂ saving estimations? The impact of field input on the LCA results for a pure vegetable oil chain". *Biomass & Bioenergy*, 34, 787-797.

Chicco G., Mancarella P., 2009. Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 13, 535-551.

Commissione Europea, 2001. Comunicazione della Commissione al consiglio, al parlamento europeo, al comitato economico e sociale e al comitato delle regioni sul sesto programma di azione per l'ambiente della Comunità "Ambiente 2010: il nostro futuro, la nostra scelta".

Commissione Europea, 2005. Comunicazione della Commissione Europea. Piano di azione per la biomassa.

Commissione Europea, 2008. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, 20-20 by 2020 Europe's climate change opportunity.

Commissione Europea, 2011. Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e al Comitato delle Regioni. Piano di efficienza energetica (PAE)

Commissione Europea, 2012. Comunicazione della commissione al Parlamento europeo e al Consiglio relativa al partenariato europeo per l'innovazione "Produttività e sostenibilità dell'agricoltura".

Consiglio Europeo di Goterborg, 2001. Conclusioni della Presidenza Consiglio dell'Unione Europea, 15-16 giugno, 2001.

Consiglio Europeo, 2004. Direttiva 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia e che modifica la direttiva 92/42/CEE.

Consiglio Europeo di Goterborg, 2006. Conclusioni della Presidenza Consiglio dell'Unione Europea, 15-16 giugno, 2006.

Consiglio Regione Toscana, 2008. Piano di indirizzo energetico (PIER).

Enea, 2005a. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Rapporto energia e Ambiente 2005, pag. 37, Volume I L'analisi.

Enea, 2005b. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Rapporto energia e Ambiente 2005. Volume II I dati.

Enea, 2010. Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Rapporto energia ed ambiente, pag 33-34.

Enea, 2010. Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Ricerca ed innovazione per un futuro low-carbon. Le fonti rinnovabili 2010, pag 43-44.

Enama, 2010. Ente nazionale per la meccanizzazione agricola, Progetto biomasse, pag. 14, ottobre 2010.

EurObserv'er, 2011. Systèmes Solaires le journal des énergies renouvelables. Baromètre biomasse solide, n° 206, pag 70.

Eurostat, 2011. Eurostat Statistical books, Energy balance sheets 2008-2009.

Fantozzi F., Buratti C., 2010. Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant. Biomass & Bioenergy, 2010, 1-9.

Ghafghazi S., Sowlati T., Sokhansanj S., Bi X., Melin S., 2011. Life cycle assessment of base-load heat sources for district heating system options. Int J Life Cycle Assess, 16, 212-223).

GSE, 2010. Rapporto statistico Gestore servizi energetici. Impianti a fonti rinnovabili, 2010, pag.13.

Guidi D., Cesano D., 2006. Opportunità di sviluppo della filiera bosco-legno-energia nel territorio del Mugello, un contributo d'analisi nell'ambito dell'agenda 21 locale Musa Bi, Comunità Montana del Mugello,10-11.

Jensen A.A., Postlethwaite D., 2008. SETAC Europe LCA Steering Committee-The early years", 13 (1),1-6.

Hammond G.P., Kallu S., McManus M.C., 2008. Development of biofuels for the UK automotive market. Applied Energy, 85, 506-515.

Hunt R.G., Franklin W.E., 1996. LCA. How It came about, personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA, v.1, n°1.

IEA, 2008. International Energy Agency, Energy technology Perspectives, pag. 3, 2008.

IPCC, 2007. Intergovernmental Panel of Climate Change, Fourth Annual Report (AR4) , 2007.

IPCC, 2011. Intergovernmental Panel on Climate Change Renewable energy sources and climate change mitigation. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011.

ISTAT, 2010. Istituto nazionale di statistica. Il sistema energetico italiano e gli obiettivi ambientali al 2020, pag. 2-3, 5-6, luglio 2010.

LaMMA, 2009. Consorzio LaMMA "Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile". Programma di Azione Locale di lotta alla siccità e desertificazione. Esperienze a confronto nel contesto nazionale, Bologna, 15 ottobre 2009.

Li Ma, 2011. Comparison of LCA between using forest based wood and natural gas for industrial heating. Course “Biomass life Cycle Analysis”, Penn State Biomass energy center, Pennsylvania state University, July 26.

Ministero dell’Ambiente, 1993. Piano nazionale per lo sviluppo sostenibile in attuazione dell’agenda 21.

Ministero dell’Ambiente e del Territorio e del Mare, 2011. Le fonti rinnovabili in Italia. Schede regionali sulla pianificazione energetica, 28/09/2011, 86-87.

Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio, 2002. Strategia d’azione ambientale per lo sviluppo sostenibile in Italia, 14.

Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, 2006. Inventario Nazionale delle foreste e dei serbatoi di carbonio (INFC).

Ministero dello Sviluppo Economico, 2010. Piano di azione nazionale (PAN) per le energie rinnovabili (direttiva 2009/28/CE).

Ministero dello Sviluppo Economico, 2011. Piano d’Azione Italiano per l’Efficienza Energetica (PAEE).

Neupane e Halog, 2009. Life cycle assessment of wood chips for biofuels production in Northeast Region of US. School of forest resources, forest bioproducts research initiative, University of Maine

NOAA, 2010. National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Climate Hights, Maggio 2010.

Pehnt M., 2008. Environmental impacts of distributed energy systems-The case of micro cogeneration. Environmental Science & Policy, II, 25-37.

Picchio R., Maesano M., Savelli S., Marchi E., 2009. Productivity and Energy Balance in Conversion of a *Quercus Cerris* L. Coppice Stand into High Forest in Central Italy. *Croat.J.for.eng.*, 30, 15-26.

Recchia L., Cini E., 2005. Life cycle analysis for a comparison between energy from biomass and fossil for the requirement of a Chianti farm (Tuscany, Italy). *Atti Conferenza*.

Recchia L. , Cini E., Corsi S., 2010. Multicriteria analysis to evaluate the energetic reuse of riparian vegetation. *Applied Energy*,87, 310-319.

Regione Toscana, 2004. Piano di indirizzo per le montagne 2004-2006, Ottobre 2004

Regione Toscana, 2008. Inventario forestale della Regione Toscana (IFT).

Regione Toscana - AIEL, 2009. Legna e cippato. Biomass trade centres. Manuale pratico. AIEL.

Rivela B., Hospido A., Moreira M.T., FeiJoo G., 2006. Life Cycle Inventory of Particleboard: a case study in the wood sector. *Int JLCA*, 11, 106-113.

Roedl A., 2010. Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice-a life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assessment*,15, 567-578.

Roy P., Nei D., Orikasa T., Xu Q., Okadome H., Nakamura N., Shiina T., 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some fH., food products”, *Journal of food engineering. Journal of Food Engineering*, 90, 1-10.

Roselli C., Sasso M., Sibilio S., Tzscheutschler P., 2011. Experimental analysis of microgenerators based on different prime movers. *Energy and Buildings*, 43, 796-804.

Senato della Repubblica, 2009. La politica energetica dell'Unione Europea. Contributi di Istituti di ricerca specializzati, pag. 14-15, gennaio 2009.

Smeets et al, 2007. Smeets E.M.W, Faaij A.P.C., Lewandowski I.M., Turkenburg W.C., 2007. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050, ScienceDirect, 33, 56-106.

Spinelli R., Magagnotti N., 2010. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of Picea abies plantations. Scandinavian Journal Research, 25, 69-77.

SETAC, 1993. Society of Environmental toxicology and chemistry. Guidelines for Life- Cycle Assessment: a Code of Practice, Brusse.

Unione Europea, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/30/EC,v23 April 2009.

Università degli Studi di Firenze, 2008. Progetto Biosit. Una metodologia Gis per uno sfruttamento efficiente e sostenibile della "risorsa biomassa" ai fini energetici.

UN, 1997. Kyoto Protocol to the united nations framework convention on climate change.

UNFCCC, 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992.

UNFCCC, 2010. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2010.

UNFCCC, 2011. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2011.

Valente C., Spinelli R., Hillring B. G., 2011. LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 19, 1931-1938.

Vertice mondiale di Johannesburg, 2002. Dichiarazione di Johannesburg sullo sviluppo sostenibile, 24 agosto-4 settembre 2002.

World Commission on Environment and Development, 1987, Report Brundtland.

Bibliografia on-line

AIEL, 2007. Associazione Italiana energie agroforestali. Legno energia contracting. www.agriforeenergy.com

AIEL, 2010. Associazione Italiana energie agroforestali. Sostenere l'organizzazione dell'offerta mercati (cippato e legna da ardere). www.biomastradecentres.eu.

IEA, 2007. International Energy Agency. World Energy Outlook. <http://www.iea.org/>

IEA, 2007. International Energy Agency Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency. <http://www.iea.org/>

IEA, 2007. Energy Technology Essentials. Biomass for Power Generation and CHP. www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm

CTI, 2003. Comitato Termotecnica Italiano Biocombustibili specifiche e classificazioni. www.cti2000.it

CIBIC, 2011. Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia in collaborazione con il Dipartimento di scienze delle Produzioni vegetali, del Suolo e dell'Ambiente agroforestale (DIPSA) dell'Università di Firenze e la Fondazione per il Clima e la Sostenibilità (FCS). www.agroenergia.net

Renergy, 2010. Produzione di energia da biomasse di legno vergine.
ww.files.meetup.com

Università degli Studi di Firenze, 2011. Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia.
Progetto Sicoter. Mercatino Web per lo scambio di biomasse agrienergetiche della
Provincia di Firenze. www.sicoter.it

RINGRAZIAMENTI

*La sostenibilità
comporta non solo una riduzione dell'uso
delle risorse tale da garantire il mantenimento
per le generazioni future,
ma anche una uguale possibilità di accedervi
da parte di tutti i popoli della terra
(UNFCCC, 1992).*

Ringrazio innanzitutto il Prof. Simone Orlandini per avermi dato la possibilità di svolgere questo studio e l'Unione Montana dei Comuni del Mugello per avermi permesso di vivere questa esperienza.

Ringrazio infinitamente la Dott.ssa Anna Dalla Marta per la professionale, paziente, preziosa e costante collaborazione prestatami e tutto il gruppo del DIPSA per la sempre calorosa accoglienza.

Un sincero ringraziamento al GAL START del Mugello per aver promosso il Progetto IPSSAM e per la continua collaborazione che ha contribuito al conseguimento dei risultati.

Un ringraziamento di cuore alle aziende (Riccianico, Consorzio Forestale Mugello e COM di Gabellini) e alle persone che le animano (Remo e Bruno Marchi, Piero Galeotti, Roberto Berti e Adriano Gabellini) per la partecipazione e collaborazione profusa alla realizzazione del progetto e, quindi, dello studio, nonché per avermi messo a disposizione la loro professionalità ed esperienza.

Ringrazio la Fondazione per il Clima e la Sostenibilità, nella figura del Prof. Maracchi e Dott.ssa Elvira Giannozzi per aver sostenuto la ricerca e per le competenze scientifiche messe a disposizione.

Ringrazio l'Ente Cassa di Risparmio di Firenze per il sostegno fornito allo sviluppo della ricerca e per la sensibilità mostrata verso le tematiche ambientali.

Infine, ma non per ultimo, ringrazio alcune persone che durante questo percorso hanno dato un prezioso e significativo contributo:

- Ing. Lapo Canuti per le competenze, l'impegno, la serietà dimostrata nella messa a punto della filiera con particolare attenzione agli aspetti energetici;
- Dott. Giuseppe Ronconi per la professionalità, la pazienza e l'esperienza con cui ha seguito i rilievi forestali;
- Dott. Angelo Milani per le competenze tecniche, la passione nonché la simpatia che hanno reso possibile le prove con il processore;
- Francesco Ristori per aver condiviso il duro lavoro dei rilievi ma anche le aspettative e le speranze da studenti;
- Ing. Marcello Scarpelli per il rigore, la correttezza e la precisione professionale con cui ha diretto i lavori in cantiere;
-
- Mariangela Milanese per la preziosa ed attenta lettura finale della tesi e per l'interesse sempre mostrato al lavoro svolto;
- Dott. Mario Fabiani per le sue capacità, per il suo entusiasmo e per essere riuscito a trasmettere con un breve video il lungo e duro lavoro che ha animato questo studio.