

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI CHIMICA INDUSTRIALE

DIPARTIMENTO DI CHIMICA INDUSTRIALE E DEI MATERIALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN CHIMICA INDUSTRIALE
CLASSE LM – 71 – SCIENZE E TECNOLOGIE DELLA CHIMICA INDUSTRIALE

**Impatto ambientale di sistemi di riscaldamento
domestico a biomasse: applicazione della
metodologia LCA (Life Cycle Assessment)**

TESI DI LAUREA SPERIMENTALE

PRESENTATA DA

Daniele Cespi

RELATORE

Prof. Fabrizio Passarini

CORRELATORI

Prof. Luciano Morselli

Dott. Luca Ciacci

SESSIONE II

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

ABSTRACT

Le biomasse hanno sempre rappresentato per l'umanità una fonte estremamente versatile e rinnovabile di risorse. Per un lungo periodo, la loro facilità di estrazione e di utilizzo le ha poste al primo posto in molte applicazioni (cottura, riscaldamento, produzione di vapore, ecc.), poi con l'avvento dei combustibili fossili, sostanze a maggior densità energetica, hanno subito un graduale rimpiazzo. Purtroppo, questa nuova classe di combustibili rappresenta una fonte esauribile, inquinante e di reperibilità incerta, poiché non omogeneamente distribuita sulla terra; pertanto con l'incremento della sensibilità ambientale l'interesse dell'opinione pubblica si sta rivolgendo verso le fonti alternative di energia. Tra queste stanno prendendo nuovamente piede le biomasse legnose, che rappresentano un'abbondante fonte per alimentare impianti di combustione volti al riscaldamento delle abitazioni e alla produzione di energia elettrica. Come in tutti i processi di combustione, anche nel caso della biomassa vengono emesse sostanze residue che possono rappresentare una fonte di danno verso la salute umana e l'ecosistema. Pertanto tali insicurezze hanno costretto la Regione Lombardia a porre il bando temporaneo di tali sistemi di riscaldamento (Legge Regionale 11 Dicembre 2006, n.24), ai fini di prevenire e contenere le emissioni in atmosfera a tutela della salute e dell'ambiente. In seguito a ciò è nato il progetto L.EN.S (Legno Energia Salute) finanziato nell'ambito dei fondi PRIN, che ha coinvolto anche il Gruppo Ambiente del Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali, con lo scopo di indagare gli impatti sulla salute umana e sull'ambiente associati all'utilizzo di tali forme di energia termica. In particolare, lo studio svolto nell'ambito della nostra Università intende approfondire l'effetto ambientale di tali sistemi di riscaldamento domestico attraverso la tecnologia di analisi LCA (Life Cycle Assessment). Lo scopo dell'elaborato di Tesi consiste nell'eseguire un'analisi dell'intero ciclo di vita di due processi di riscaldamento domestico che utilizzino biomassa legnosa: una stufa innovativa a legna e una stufa a pellet. L'analisi ha quindi posto a confronto i due scenari con ulteriori mezzi di riscaldamento domestico alternativi quali: il boiler a gas, il pannello solare termico integrato con caldaia a gas e la pompa di calore elettrica. Dal confronto è emerso come tra i due scenari a biomassa quello decisamente più impattante verso le categorie *salute umana* e *qualità dell'ecosistema* risulti il processo che impiega la stufa a legna, mentre per lo scenario a pellet si è riscontrato un impatto maggiore del precedente nella categoria *consumo di risorse*. Dall'analisi di contributo è emerso che l'impatto percentuale maggiore per entrambi gli scenari sia legato allo smaltimento delle ceneri, pertanto si è ipotizzata una soluzione alternativa in cui esse vengano smaltite nell'inceneritore; ciò ha fatto prevedere una notevole riduzione degli impatti. In particolare, osservando i risultati del punteggio singolo si

può constatare come lo scenario di riscaldamento a legna produca un quantitativo di particolato (PM 10) assai superiore rispetto al processo di riscaldamento a pellet, chiaramente dovuto alle caratteristiche chimico-fisiche dei combustibili ed alla conseguenza efficienza di combustione.

Dal confronto con gli scenari di riscaldamento alternativi è emerso che il sistema più impattante per le categorie *salute umana* e *qualità dell'ecosistema* rimane quello a legna, seguito dallo scenario a pellet, mentre i processi alternativi presentano impatti maggiori alla voce *consumo di risorse*.

Infine per avvalorare i risultati ottenuti per i due metodi a biomassa è stata eseguita un'analisi di incertezza attraverso il metodo Monte Carlo, ad un livello di confidenza pari al 95%.

In conclusione si può affermare che i sistemi di riscaldamento domestico che impiegano processi di combustione della biomassa legnosa sono certamente assai vantaggiosi, poiché pareggiano il quantitativo di CO₂ emessa con quella assorbita durante il ciclo di vita, ma al tempo stesso possono causare maggiori danni alla salute umana e all'ecosistema rispetto a quelli tradizionali.

Pertanto, in vista degli obiettivi proposti dalla direttiva europea 2009/28/CE, sul raggiungimento di prefissati limiti utilizzando anche fonti rinnovabili a biomassa, è bene fare attenzione alla tipologia di combustibile e tecnica da privilegiare, per garantire al tempo stesso l'ottenimento dei traguardi individuati e la prevenzione della salute umana e dell'ecosistema.

Biomasses have always represented a versatile and renewable resource for the humanity since ancient times. For a long period, their easy extraction and exploitation allowed their use in many fields (cooking, heating, steam production, etc.) until they have been replaced by fossil fuels, substances with higher energy density. Unfortunately, this class of fuels represents an exhaustible and polluting source, as well as of uncertain availability, not homogeneously diffused on the Earth; therefore, with the increase of environmental awareness, social interest turned towards renewable energy sources. Among these, woody biomass could be a very important source, because it can be used as a fuel to feed combustion plants that can produce heat or electricity. Like other burning processes, the combustion of woody biomass produces substances that could have negative impact on human health and ecosystem quality. Due to this concern, Lombardy Region temporarily banned biomass heating systems (Regional Law, 11 December 2006, n.24), to prevent and contain the air emissions to protect the human health and ecosystem quality. In this context, a project, named L.EN.S. (Wood-Energy-Health) was funded by Italian Ministry of Research (“PRIN” projects), involving the Environment Research Group of the Department of Industrial Chemistry – University of Bologna, to investigate the impacts, on human health and ecosystem of biomass heating systems.

In particular, in this study LCA methodology was applied with the aim of analyzing from a life cycle perspective two combustion processes that use woody biomass as a fuel : an innovative woody stove and a pellet stove. Furthermore, we compared their environmental performance with other and innovative technologies o produce heat: natural gas boiler, solar panel within an integrated system and electric heat pump. The results showed that the heating process which used wood has higher impacts than the pellet stove in terms of *human health* and *ecosystem quality* categories, especially for the high production of particulate matter (PM 10) due to the physical-chemical fuel features; on the other hand, the pellet stove shows worst results for the *resources depletion category*. Furthermore, from the contribution analysis it resulted that for both biomass processes the most impacting process relates to the ash disposal: thus, we considered the hypothesis to incinerate them in order to achieve better environmental performances. From a synthetic overview, the wood and pellet stoves exhibited higher impacts in the category human health and ecosystem quality compared to the other scenarios, which in turn showed higher impacts for the *resources depletion category*.

To validate the results we applied Monte Carlo method, with a confidence interval of 95%.

In conclusion, it can be stated that although the biomass heating systems would emit the same quantity of CO₂ that have been assimilated during the entire life, however they could provoke damage to human health, due to the impacting emissions from their combustion. In order to

reach the requirements of the 2009/28/CE Directive, on the promotion of the use of energy from renewable sources that also includes energy from biomass, policy and community should choose the best techniques that permits both the targets achievement of and the avoidance or minimization of the adverse effects on human health and ecosystem quality.

INDICE

PARTE GENERALE	9
1. SCOPO DELLO STUDIO	10
2. INTRODUZIONE	11
2.1 Scenario energetico attuale	11
3. SCENARI DI RISCALDAMENTO DOMESTICO BIOMASSA	14
3.1 Introduzione generale agli scenari di riscaldamento domestico a biomassa	14
3.1.1 Legge Regionale 11 Dicembre 2006, n.24	16
3.1.2 Progetto LENS	19
3.1.3 Stato dell'arte della normativa Europea	21
3.1.4 Il processo di combustione	21
3.2 La legna	24
3.2 .1 Descrizione del combustibile	24
3.2 .2 La filiera bosco-legna-energia	25
3.2 .3 Normativa di riferimento	26
3.2 .4 Descrizione generale dello scenario “stufa a legna”	29
3.3 Il pellet	31
3.3.1 Classificazione	31
3.3.2 Filiera di produzione del pellet	31
3.3.3 Normativa di riferimento	34
3.3.4 Descrizione generale dello scenario “stufa a pellet”	39
4. SCENARI DI RISCALDAMENTO DOMESTICO ALTERNATIVI	41
SCELTI PER CONFRONTO	
4.1 Introduzione generale agli scenari di riscaldamento domestico alternativi	41
4.2 Boiler a gas	42
4.2.1 Tecnologia utilizzata	42
4.2.2 Combustibile	42
4.3 Solare Termico	46
4.3.1 Energia dal Sole	46

4.3.2	La tecnologia del solare termico	50
4.4	Pompa di calore	55
4.4.1	Descrizione generale della tecnologia	55
4.4.2	Principio di funzionamento ed efficienza	55
5.	LA METODOLOGIA LCA	59
5.1	Che cos'è la metodologia LCA (Life Cycle Assessment)?	59
5.2	Struttura di una LCA	61
5.2.1	Definizione degli obiettivi e degli scopi (Goal and scope definition)	63
5.2.1.1	Definizione dei confini di sistema	64
5.2.1.2	Definizione dell'unità funzionale e del flusso di riferimento	66
5.2.1.3	Criteri per la scelta dei flussi in ingresso ed uscita	67
5.2.1.4	Criteri di allocazione	67
5.2.2	Analisi di inventario (Life Cycle Inventory, LCI)	68
5.2.2.1	Requisiti di qualità ed affidabilità dei dati	69
5.2.3	Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)	72
5.2.3.1	Il metodo ReCiPe 2008	73
5.2.3.1	Il concetto di "Cultural Theory"	84
5.2.4	Interpretazione e miglioramento	86
5.2.4.1	Analisi di sensibilità	86
5.2.4.2	Analisi di contributo	87
5.2.4.3	Analisi di incertezza	87
6.	IL SOFTWARE E IL DATABASE DI RIFERIMENTO	89
6.1	Il software SimaPro	89
6.2	Il database Ecoinvent	90

PARTE SPERIMENTALE	92
7. ANALISI DEL CICLO DI VITA, ASPETTI COMUNI A TUTTI GLI SCENARI	93
7.1 Definizione degli obiettivi e degli scopi	93
7.1.1 Definizione degli obiettivi	93
7.1.2 Definizione degli scopi	94
7.1.2.1 Definizione confini di sistema	94
7.1.2.1.1 Confini ciclo di vita	94
7.1.2.1.2 Confini geografici	94
7.1.2.1.3 Confini di carico ambientale	94
7.1.2.1.4 Confini temporali	94
7.1.2.2 Definizione unità funzionale	95
7.1.2.3 Infrastrutture e smaltimento	95
7.1.2.4 Trasporti	96
8. ANALISI DI INVENTARIO, MODELLAZIONE SCENARI DI RISCALDAMENTO DOMESTICO A BIOMASSA	97
8.1 Aspetti comuni nella modellazione degli scenari a biomassa	97
8.1.1 Ammontare di combustibile ed emissioni	98
8.1.2 Verifica incidenza della costruzione della tecnologia	100
8.2 Modellazione Scenario di Riscaldamento domestico con stufa innovativa a legna	102
8.2.1 Combustibile	102
9.2.1.1 Composizione e caratteristiche chimico fisiche	102
9.2.1.2 Approvvigionamento	104
8.2.2 Trasporto	104
8.2.3 Potenza della stufa	104
8.2.4 Efficienza ed emissioni	104
8.2.5 Percentuale di ceneri e loro trattamento	105
8.2.6 Possibilità di sfruttare sfalci da potature	106
8.3 Modellazione Scenario di Riscaldamento domestico con stufa a pellet	108

8.3.1	Combustibile	108
8.3.1.1	Composizione e caratteristiche chimico fisiche	108
8.3.1.2	Approvvigionamento	109
8.3.2	Trasporto	110
8.3.2.1	Verifica incidenza del trasporto	110
8.3.3	Potenza della stufa	111
8.3.4	Efficienza ed emissioni	112
8.3.5	Percentuale di ceneri e loro trattamento	112
9.	ANALISI DI INVENTARIO, MODELLAZIONE SCENARI DI RISCALDAMENTO ALTERNATIVI	113
9.1	Scenario di riscaldamento domestico mediante boiler a gas	113
9.2	Scenario di riscaldamento domestico mediante pannello solare termico	114
9.3	Scenario di riscaldamento domestico mediante pompa di calore	115
9.4	Verifica incidenza della costruzione della tecnologia	115
10.	QUALITÀ DEI DATI	117
11.	VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI	120
11.1	Categorie e metodo di valutazione degli impatti	120
11.2	Analisi di contributo	121
11.3	Valutazione del danno	125
12.	INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI	143
12.1	Analisi di contributo	143
12.2	Valutazione del danno	148
12.3	Analisi di incertezza	152
13.	CONCLUSIONI	161
14.	BIBLIOGRAFIA	164

PARTE GENERALE

1. SCOPO DELLO STUDIO

Il seguente lavoro di Tesi espone un progetto sperimentale di ricerca riguardante la valutazione di impatti ambientali associati a metodi di riscaldamento domestico. Nell'ambito del progetto LENS (Legno Energia Salute, finanziato nell'ambito dei fondi PRIN, che ha coinvolto il Gruppo Ambiente del Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali) l'attenzione è stata rivolta principalmente a metodi di riscaldamento a biomassa nella realtà Lombarda, quali:

- stufa a legna
- stufa a pellet

L'approccio scientifico per la quantificazione e la caratterizzazione degli impatti sull'ambiente, suddivisi negli effetti relativi a salute umana, qualità dell'ecosistema e consumo delle risorse, è il risultato dell'applicazione della metodologia di Valutazione del Ciclo di Vita, o *Life Cycle Assessment* (LCA), eseguita mediante l'utilizzo del software SimaPro 7.2 e il database Ecoinvent 2.0.

Attraverso la tecnica LCA si vuole inoltre porre a confronto le metodologie di riscaldamento oggetto di indagine con altre tecniche sfruttate nell'area residenziale italiana:

- boiler a gas
- pannello solare termico
- pompa di calore

In conclusione lo scopo principale del lavoro è quello di fornire dati ed un giudizio critico riguardo alle diverse tecnologie esaminate, potenzialmente utile ai decisori come strumento di interpretazione e di supporto a scelte politiche, ed alla cittadinanza per un incremento della sensibilizzazione verso tali problematiche.

2. INTRODUZIONE

2.1 Scenario energetico attuale

La complessa sfida che sta caratterizzando il ventunesimo secolo è certamente quella della salvaguardia dell'ambiente, il quale, a causa di tutte le attività umane, viene costantemente degradato, sottratto di risorse e trasformato, a volte irreversibilmente. Questa problematica potrebbe essere vista da alcuni come una questione irrisolvibile, a causa delle molte variabili che tendono ad aggravarla, fra cui l'incremento del carico ambientale crescente di una popolazione mondiale in aumento, che secondo le stime dell'O.N.U. arriverà a 9 miliardi già nel 2050. Secondo le previsioni, a questa crescita, determinata in particolare dalle nazioni in via di sviluppo, farà riscontro un proporzionale incremento della richiesta di energia, imprescindibile per garantire le attività civili ed industriali. Ovviamente la richiesta di energia da parte di questi popoli dipende da una crescita economica difficilmente contenibile, ma i Paesi industrialmente più sviluppati dovrebbero aiutare favorire tecnologicamente e culturalmente delle scelte energetiche più sostenibili, che riguardino, oltre al settore trasporti e produzione industriale, anche quello più vicino ad ogni singolo cittadino: le infrastrutture abitative.

Quest'ultimo aspetto viene spesso dimenticato, anche se attualmente la sensibilità pubblica si sta sempre più evolvendo, come dimostra una crescente diffusione delle cosiddette case passive, abitazioni che siano in grado di avere un impatto sull'ambiente minimo. Differentemente da tali edifici innovativi, le abitazioni tradizionali hanno molti più sprechi, che si ripercuotono negativamente sull'ambiente, primo fra i quali il comparto del riscaldamento domestico, che da sempre è una delle più rilevanti voci di spesa domestiche. Gran parte del costo è associato all'approvvigionamento di combustibile, che in alcuni casi



Figura 1 Fotografia con spettro infrarosso di un'abitazione [44]

viene maggiorato dall'inefficienza delle strutture abitative. Di fatti fino a pochi anni fa, c'è stata poca attenzione nella fase di costruzione delle abitazioni, le quali spesso venivano edificate senza interessarsi molto a soluzioni utili per diminuirne gli sprechi, come mostra la fotografia con spettro infrarosso riportata in Figura 1, scattata da Tyrone Turner su una casa del 1910.

Questo scatto, pur riferendosi ad un'abitazione di più di un secolo fa, rispecchia perfettamente la condizione in cui vengono a trovarsi gran parte degli edifici costruiti in tempi più recenti. Si nota immediatamente come le fughe energetiche si concentrino principalmente su tetti e telai delle finestre, luoghi in cui l'isolamento verso l'esterno è minimo. Se si compie una stima generale, ciò provoca negli Stati Uniti il 40% delle emissioni di CO₂ (Gore Al, 2010) e li fa collocare al primo posto nella scala di inefficienza energetica degli edifici. Purtroppo questo trend negativo non investe esclusivamente i paesi oltreoceano, ma anche il nostro Paese, che pur essendo tra i più sviluppati in Europa, si colloca al penultimo posto tra i paesi che hanno implementato l'efficienza energetica tra il 1990 e il 2004, Figura 2 (WWF Italia, 2009)

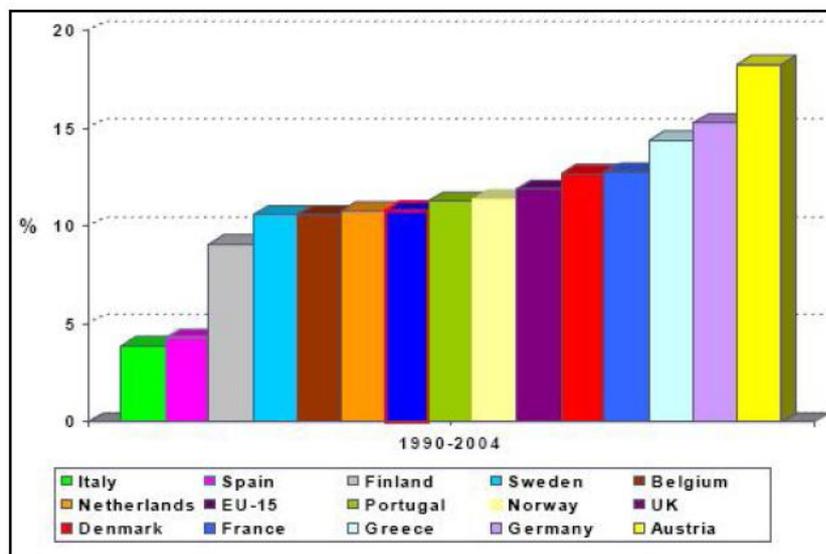


Figura 2 Variazione 1990-2004 nell'efficienza energetica nei Paesi UE15 (fonte: ADEME, Evaluation of Energy Efficiency in the EU15: Indicators and Measures, Paris 2007)

Ma oltre all'implementazione dell'efficienza energetica delle infrastrutture, per la quale bisognerebbe aprire un capitolo a parte, si vuole qui porre l'attenzione su quali siano gli impatti ambientali associati a diversi sistemi di riscaldamento domestico. Molto spesso si rivolge poco interesse al settore del riscaldamento domestico, credendo che esso copra una piccola parte dei nostri consumi totali di energia. Questa situazione viene mostrata chiaramente nel primo dei grafici a torta riportati in Figura 3, dove da un'indagine condotta da Eurobarometer nell'anno 2007, la grande maggioranza dei cittadini europei dimostra di avere una percezione sbagliata della realtà, pensando che il riscaldamento delle abitazioni sia la causa di solo il 26% del consumo energetico totale. In verità la situazione reale, riportata nel secondo grafico, è ben diversa: il consumo di energia termica va ben oltre il 50% del totale,

comportando di conseguenza un impatto assai elevato, che spesso si ripercuote negativamente sulla salute umana (Armaroli & Balzani, 2004; 2008).

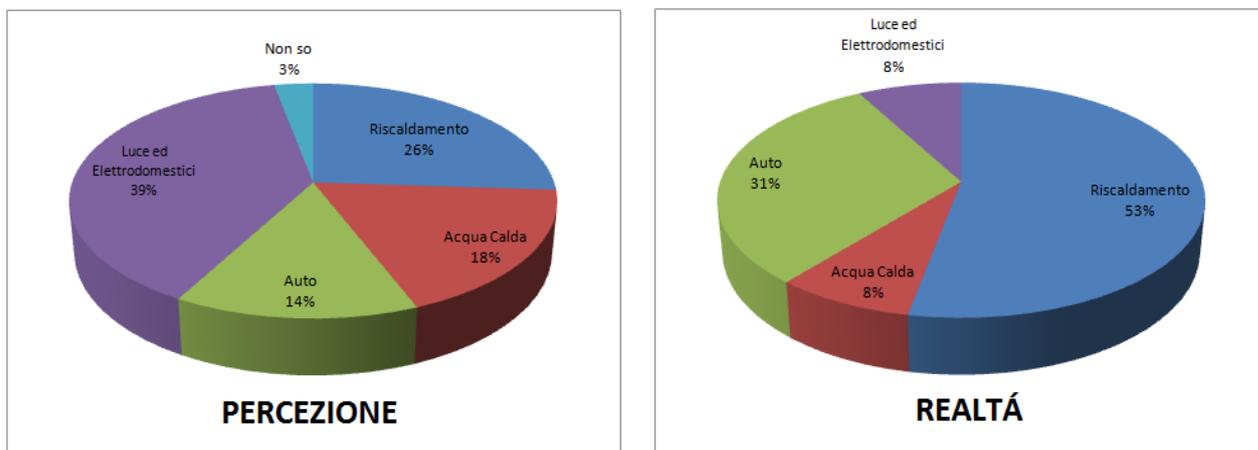


Figura 3 I consumi energetici domestici in Europa: la distribuzione percepita dai cittadini (sinistra) e quella effettiva (destra)(fonte dei dati: Eurobarometer 2007)

Inoltre bisogna constatare che questa particolare distribuzione dei consumi totali energetici non è un fenomeno semplicemente associato allo stile di vita del nuovo millennio, poiché analizzando il trend di tale ripartizione dai primi anni '90 ad oggi (Figura 3) ci si accorge che è un fenomeno che è rimasto all'incirca costante nel tempo (WWF Italia, 2009).

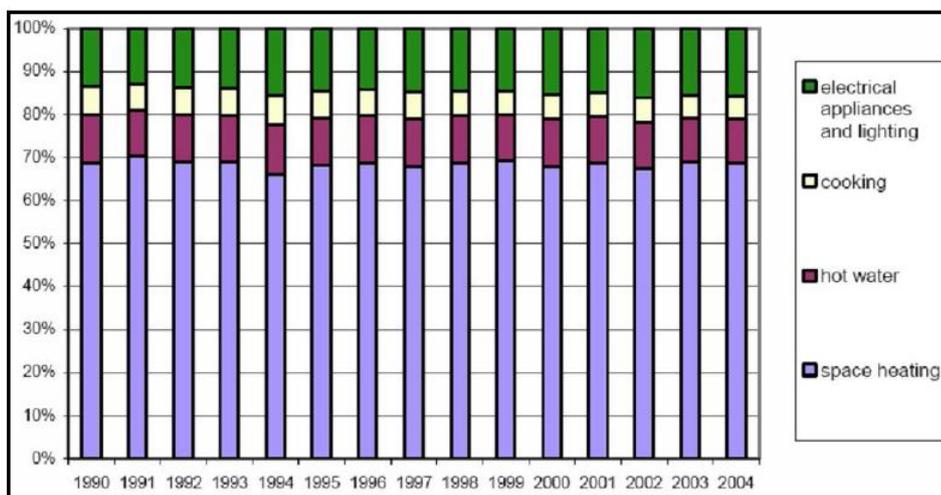


Figura 4 Ripartizione degli usi finali di energia nel settore domestico (fonte: ENEA 2006, EU Project ODYSSEE-MURE)

Ma solo da poco tempo, grazie all'aumento della sensibilità verso temi ambientali, tale argomento è divenuto il fulcro di molte discussioni scientifiche portando ad un approfondimento sempre maggiore sulla tematica attraverso studi sui possibili effetti delle forme di riscaldamento sulla salute umana. Per questo motivo il presente lavoro di tesi è stato incentrato sullo sviluppo di una metodologia di analisi LCA volta ad individuare quelli che

sono gli impatti ambientali e le ripercussioni sulla salute umana di processi di riscaldamento domestico. Studi di LCA come questo sono fondamentali per completare ed affiancare analisi chimiche, poiché permettono di sfruttare al meglio i dati ottenuti mediante monitoraggio ambientale per ottenere un quadro completo sulle ripercussioni dei processi oggetto di indagine.

3. SCENARI DI RISCALDAMENTO DOMESTICO A BIOMASSA

3.1 Introduzione generale agli scenari di riscaldamento domestico a biomassa

Il lavoro di tesi nasce dalla collaborazione del gruppo Ambiente del Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali dell'Università degli Studi di Bologna, con tre enti di ricerca:

- Università degli Studi di Milano – Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio (DISAT),
- Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Scienze Chimiche,
- Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Farmacologiche,

nell'ambito del progetto L.EN.S. (Legno Energia Salute), con lo scopo di indagare, mediante un'analisi *LCA*, il comportamento ambientale di metodi di riscaldamento domestico, presenti nella Regione Lombardia, che sfruttano legna e suoi derivati come combustibile. I motivi che hanno comportato la nascita di tale progetto sono stati da un lato il crescente aumento di tali sistemi di riscaldamento nella realtà italiana, specialmente in quella di città, e dall'altro la volontà di verificare l'incidenza sull'ambiente dell'utilizzo di tecniche che sfruttano materiale rinnovabile come combustibile. Di fatti sia la legna che i suoi derivati (pellet, cippato, bricchette, ecc.) appartengono alla classe dei *biocombustibili* (in inglese *biofuels*), ovvero costituiti da *biomassa*, termine che designa qualsiasi sostanza organica di origine vegetale o animale, da cui sia possibile ottenere energia, attraverso processi di tipo termochimico o biochimico. Dette sostanze sono disponibili come prodotti diretti o residui del settore agricolo-forestale, come sottoprodotti o scarti dell'industria agro-alimentare e come scarti della catena di distribuzione o dei consumi finali.

Attualmente tale fonte di energia è sfruttata principalmente nei Paesi in via di sviluppo, mentre in quelli industrializzati il contributo delle biomasse all'energia globale mediamente non arriva al 3%. Si potrebbe ipotizzare di incrementare questa percentuale marginale, perlomeno in Paesi con abbondante materia prima, come ad esempio l'Italia, che possiede un volume complessivo di legname pari a 1,5 miliardi di m³ ed un accrescimento annuo di 30

milioni di m³ (UN-ECE/FAO, 2000). Ogni anno il nostro Paese sfrutta 9 milioni di m³, circa il 30% dell'accrescimento (CFS, 2000), di cui 5,4 milioni di m³ sono utilizzati come legna da ardere (WWF Italia, 2009). Questi dati servono a comprendere come la possibilità di incrementare lo sfruttamento di tale fonte di energia sia reale, comportando una diminuzione del consumo di combustibili fossili, che a differenza della legna non sono rinnovabili. Inoltre è bene sottolineare come già a partire dal 2005 la Commissione Europea abbia considerato l'importanza dell'utilizzo di biomasse attraverso l'emanazione del "*Biomass Action Plan*". In questo programma si prevede un incremento nell'uso di tali risorse passando dai 289.000TJ prodotti nel 2003 ai 628.000TJ come target al 2010, con un abbassamento dei costi e delle dipendenze energetiche (Caserini et al., 2010).

Da un sondaggio effettuato nella Regione Lombardia e riportato in un lavoro redatto per European Commission – Joint Research Centre (Pastorello & Dilara, 2008), è emerso che gran parte del campione indagato ha deciso di rivolgersi all'utilizzo di biocombustibili per motivi puramente economici (Figura 5), mentre il 12% circa è convinto di utilizzare un mezzo più ecologico di molti altri. Tale convinzione può essere in parte giustificata dal fatto che le biomasse sono in grado di fissare ogni anno $2 \cdot 10^{11}$ tonnellate di carbonio, assorbito sotto forma di CO₂ e convertito, sfruttando l'energia solare, in materia organica a più alta energia. Ciò equivale a dire che esse rappresentano un magazzino di carbonio, con un contenuto energetico pari a 70 tonnellate di petrolio equivalente (Bonoli, 2007), che una volta combusto rilascia nell'atmosfera un quantitativo di CO₂ pari quello assorbito durante la sua crescita. Questo sta a significare che l'utilizzazione a fini energetici di biocombustibili non contribuisce ad incrementare l'effetto serra naturale (se non nelle fasi di trasporto e pre-trattamento), poiché la combustione chiude il ciclo del carbonio rimettendolo in atmosfera; resta tuttavia ancora qualche perplessità riguardo all'effettiva sostenibilità del metodo rispetto ad altri, dato che l'emissione di CO₂ non è l'unico impatto ambientale da considerare, anche se ultimamente ha assunto un'importanza prioritaria.

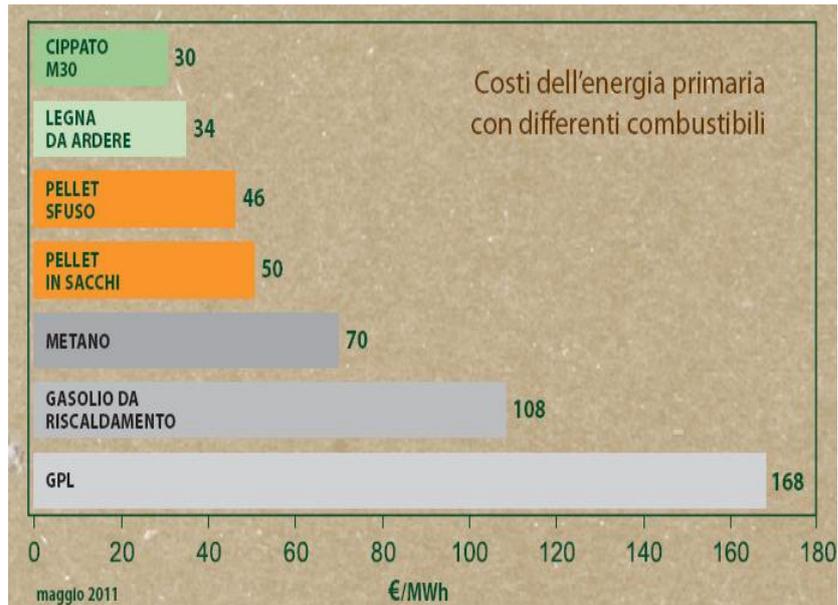
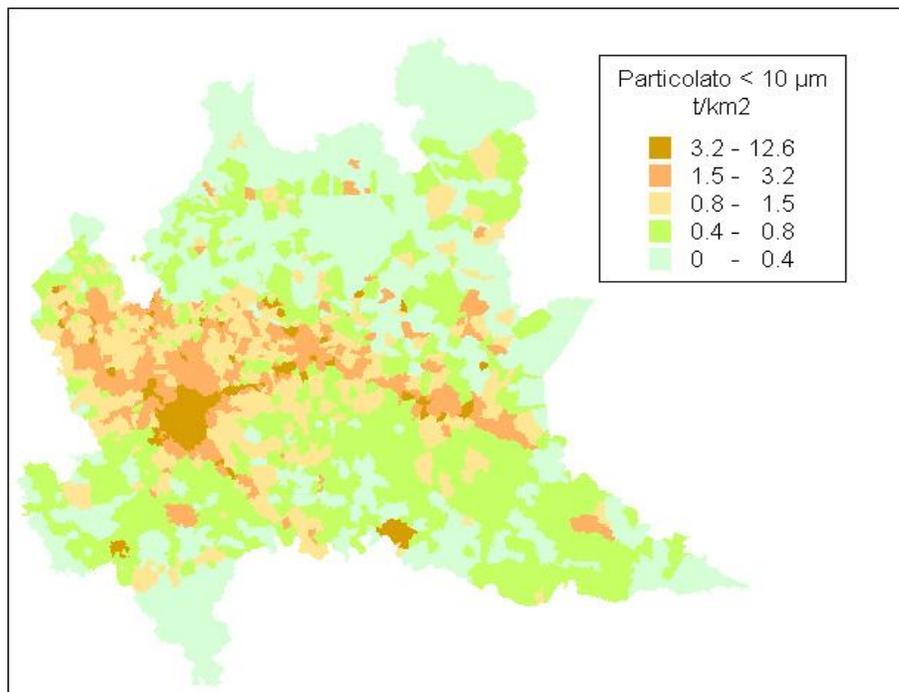


Figura 5 Costi energia primaria con differenti combustibili [3]

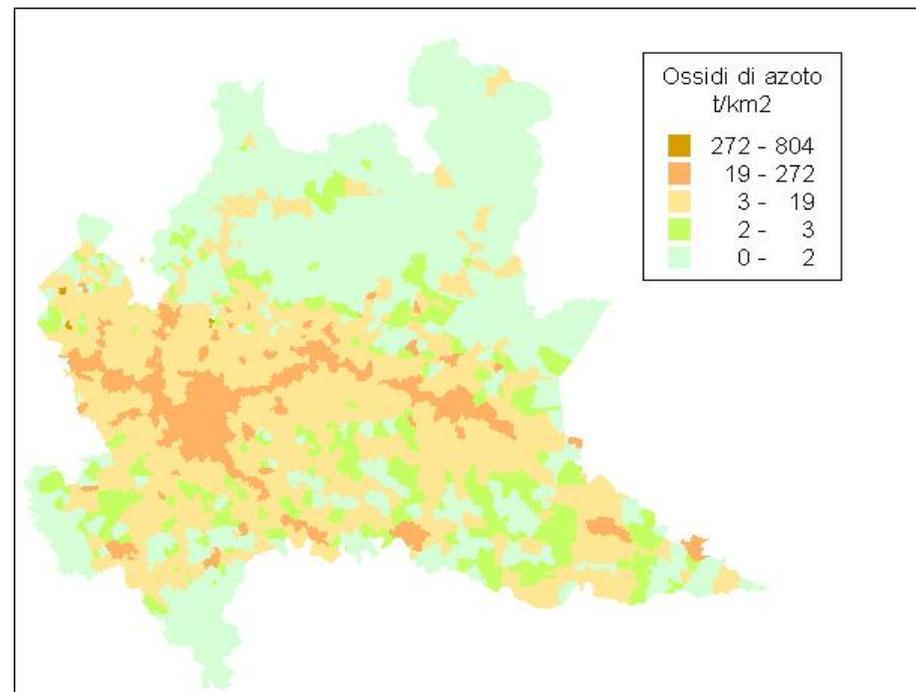
3.1.1 Legge Regionale 11 Dicembre 2006, n.24

Questa incertezza sulla sostenibilità dell'utilizzo di biomasse, in particolare l'incremento potenziale della concentrazione di particolato atmosferico a seguito di un'emissione da stufe o caldaie domestiche, ha interpellato anche l'Amministrazione della Regione Lombardia, che si è sentita costretta ad emanare la legge regionale n.24 dell'11 Dicembre del 2006, con la quale sono stati fissate le *Norme regionali per la prevenzione e la riduzione delle emissioni nell'atmosfera a tutela della salute e dell'ambiente*. L'esigenza della deliberazione di tale norma è scaturita dall'emanazione della Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. Inoltre l'attenzione è stata sottolineata dall'ente preposto al monitoraggio ed alla salvaguardia della qualità ambientale della Regione, ARPA Lombardia, che ha mostrato una situazione di criticità della qualità dell'aria, dovuta principalmente al traffico veicolare ed alle emissioni da piccoli sistemi di combustione domestica. Tali studi sono stati eseguiti attraverso il modello chimico-dispersivo FARM, che mostra la reale concentrazione di inquinante per km² (ARPA Lombardia, 2011). Di seguito vengono riportate alcune delle mappe che ne risultano.

Mappa delle emissioni di PM10 (2008)



Mappa delle emissioni di NO_x (2008)



Mappa delle emissioni dei gas serra (2008)

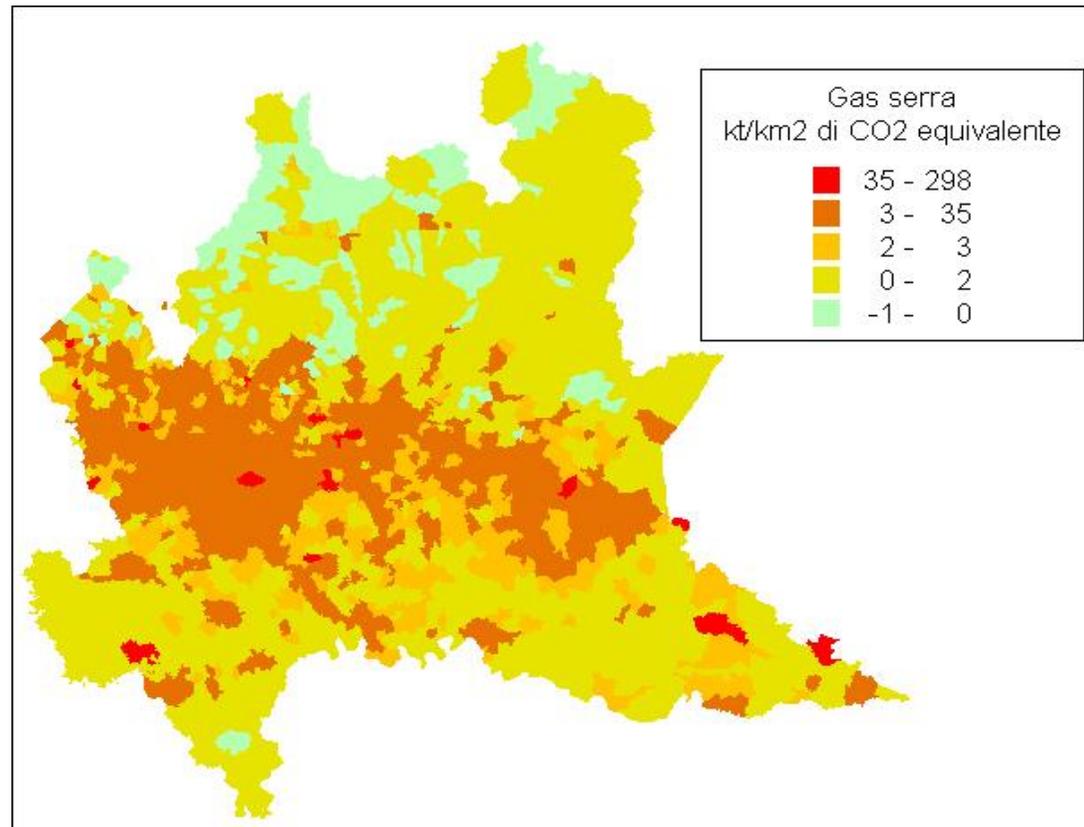


Figura 6 Dispersione dei principali inquinanti espressa in massa di sostanza per superficie (fonte: INEMAR- INventario EMissioni ARia - Regione Lombardia - Risultati regionali 2008)

In particolare nella delibera n.007635 del 2008 sono riportate le misure adottate per il contenimento dell'inquinamento da combustione di biomasse legnose e l'ambito di applicazione. Ai sensi dell'articolo 11, comma 1, lettera b), della legge n.24, dal 15 Ottobre al 15 Aprile 2009 è stato vietato l'utilizzo di apparecchi per il riscaldamento domestico funzionanti a biomassa legnosa (come definita nella norma UNI CEN/TS 14588), nel caso siano presenti altri impianti di riscaldamento alimentati con altri combustibili ammessi, appartenenti alle seguenti categorie (Regione Lombardia, *Deliberazione n° VIII/007635* 11, Luglio 2008):

- camini aperti;
- camini chiusi, stufe e qualunque altro tipo di apparecchio domestico alimentato a biomassa legnosa che non garantisca il rispetto dei seguenti requisiti:
 - rendimento energetico $\eta \geq 63\%$;
 - valore di emissione di monossido di carbonio (CO) $\leq 0,5\%$ in riferimento ad un tenore di ossigeno (O₂) del 13%, riferito ai gas secchi a 0°C e a 1,013 bar.

L'ambito di applicazione del divieto sopra riportato, considerando le modalità medie di dispersione degli inquinanti in atmosfera, è stato esteso alla Zona A1 del territorio lombardo ed a tutti i Comuni del residuo territorio regionale la cui quota altimetrica risulti uguale o inferiore ai 300 m sul livello del mare. Nei Comuni il cui territorio in parte sia posto ad altitudini superiori ai 300 m sul livello del mare, sono stati incaricati i Sindaci di individuare tali zone, soggette a questa regolamentazione. In caso di mancata identificazione tutto il Comune è stato soggetto a restrizione.

3.1.2 Progetto LENS

Il divieto temporaneo dell'utilizzo di apparecchi a biomassa in ambito domestico, assieme alla volontà di chiarire il dibattito sulla compatibilità di tali strumenti con la qualità dell'ecosistema e della salute umana, ha dato stimolo alla nascita del progetto LENS.

L'acronimo L.EN.S. è l'abbreviazione di Legna ENergia Salute, parole che insieme riassumono la *mission* del progetto. Tale programma, coordinato dall'Università di Milano-Bicocca, ha durata di due anni ed è volto alla comprensione e valutazione dell'impatto sull'ambiente e degli effetti sulla salute umana generati dal materiale particolato e dai composti potenzialmente tossici presenti nelle emissioni di impianti domestici di combustione (stufe, caminetti, forni) che utilizzano la legna come combustibile, e nell'aria ambiente, all'interno e all'esterno dei luoghi dove avviene la combustione. Per contribuire al

raggiungimento degli obiettivi indicati nel progetto, il lavoro di Tesi ha studiato in modo sistemico gli impatti dell'intero ciclo di vita del riscaldamento domestico che utilizza legna e suoi derivati come combustibile, ponendoli anche in relazione ad altri sistemi di riscaldamento. Sarà valutato il rischio per l'uomo e l'impatto sull'ambiente e saranno indicate misure di prevenzione e/o di miglioramento tecnologico per i sistemi di combustione.

3.1.3 Stato dell'arte della normativa Europea

Quest'interesse riguardo al settore biomassa non ha colpito esclusivamente l'opinione pubblica italiana, ma anche a livello europeo l'attenzione di molti enti si è rivolta in questa direzione. Comprendendo l'importanza e la potenzialità di tali risorse, soprattutto in vista degli obiettivi europei del 2020, il Comitato Europeo di Normalizzazione (CEN) si è mosso per mettere a punto norme sulla famiglia dei biocombustibili, atte a garantirne l'integrità e il rispetto di parametri in esse prefissati. In particolare la norma di riferimento è la serie UNI EN 14961, definita *Solid biofuel- Fuel specification and classes*, articolata come segue:

- UNI EN 14961-1 *Requisiti generali*, già stata pubblicata;
- UNI EN 14961-2 *Pellet da legno per utilizzo non industriale*, in fase di stesura;
- UNI EN 14961-3 *Bricchetti di legno per utilizzo non industriale*, in fase di stesura;
- UNI EN 14961-4 *Cippato di legno per utilizzo non industriale*, in fase di stesura;
- UNI EN 14961-5 *Legna da ardere per utilizzo non industriale*, pubblicata;
- UNI EN 14961-6 *Pellet non da legno per utilizzo non industriale*, in fase di stesura.

La serie UNI EN 14961 non è dunque stata completamente ultimata, tuttavia è stato possibile acquisire alcuni dati e schede tecniche dalla EN 14961-1, EN 14961-2 e EN 14961-5. Le informazioni verranno presentate più avanti nello studio.

3.1.4 Il processo di combustione

La degradazione della legna, come di qualsiasi materiale organico, può avvenire per via biologica o per via chimica. Nel secondo caso parliamo della combustione, una reazione chimica nella quale una sostanza che subisce ossidazione, detta combustibile, reagisce con una sostanza ossidante, detta comburente (AIEL, 2011; Ilarioni, 2007). In particolare essa può essere articolata in tre fasi che non sono distinguibili, ma si sovrappongono durante l'avvenimento del processo.

1. Essiccazione: il combustibile si riscalda per irraggiamento, convezione e conduzione. Quando si raggiunge una temperatura attorno ai 100°C inizia la perdita dell'acqua in esso contenuta, la velocità del processo è proporzionale al quantitativo del liquido. In questa fase, che procede fino al raggiungimento dei 220°C, viene assorbito calore ed emesso vapore d'acqua (AIEL, 2011; Ilarioni, 2007).
2. Pirolisi: nell'intervallo di temperatura compreso tra i 220 °C ed i 270 °C il combustibile inizia la sua decomposizione in componenti volatili (gas e vapori) e carbonio solido. Quando si raggiungono i 500 °C circa l'85% del peso della legna si

presenta sotto forma di composti volatili, cioè i composti macromolecolari come la cellulosa divengono a catena più corta, per poi trasformarsi in gas (CO, idrocarburi, ecc.).

3. Gassificazione e combustione: per garantire l'avvenimento della gassificazione è necessario garantire "aria primaria" nella zona di combustione. Ma per permettere l'ultimo stadio, quello di combustione completa si deve raggiungere una temperatura superiore ai 500 °C; ciò è possibile grazie all'emissione di "aria secondaria" che garantisce la completa ossidazione dei prodotti gassosi, quali CO ed idrocarburi, ad H₂O e CO₂.

Di seguito si riporta un grafico che mostra in termini percentuali cosa succede durante la fase di combustione.

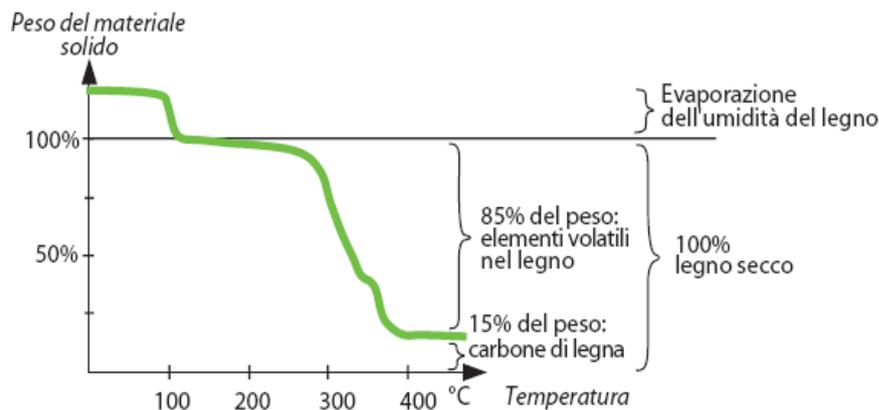
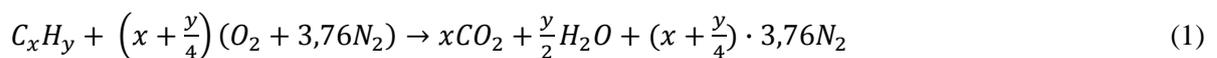


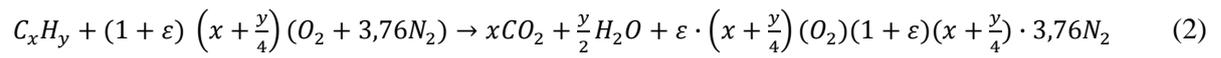
Figura 7 Suddivisione percentuale delle componenti del legno e loro comportamento durante la combustione [2]

Nel nostro caso il combustibile è la legna, mentre il comburente è l'ossigeno, sta di fatto che è possibile generalizzare il discorso della combustione, estendendolo alle altre tipologie di combustibile, attraverso la seguente relazione:



Il 3,76 corrisponde al rapporto che c'è tra la quantità di azoto e quella di ossigeno in atmosfera, mentre i pedici x ed y fanno riferimento alla tipologia di combustibile.

Ovviamente con tale formula si fa riferimento ad un quantitativo stechiometrico di ossigeno, che nella realtà non è sufficiente per ottenere l'ossidazione completa di tutto il combustibile. Pertanto, per evitare che nei prodotti della combustione possano rimanere quantità elevate di incombusti, è necessario lavorare con un eccesso di aria (ϵ).



Di seguito, vengono descritti in dettaglio i processi a cui si è fatto riferimento mentre per le scelte effettuate riguardo la modellazione dello scenario, si rimanda alla descrizione riportata nella Parte Sperimentale.

3.2 La legna

3.2.1 Descrizione del combustibile

Il legno, o meglio la legna da ardere, è un combustibile ottenuto dai fusti delle piante, in particolare da alberi e da arbusti. Tale materiale è costituito principalmente da cellulosa (20-30%), emicellulosa (15-30%), lignina (15-20%) e tannini (2-10%), composizione che si mantiene all'incirca costante, anche se può variare in base alla tipologia di pianta. Questi componenti principali vengono anche indicati con il nome "estratti", termine che deriva dalla possibilità di essere totalmente o parzialmente estratti mediante alcuni processi chimici. Solitamente tale sostanza contiene un quantitativo molto basso di sali minerali, derivanti dall'acqua assorbita, che durante il processo di combustione producono alcuni decimi percentuali di ceneri.

In botanica gli alberi vengono classificati in due grandi gruppi: legni dolci (*softwood*) e legni duri (*hardwood*); solitamente, ma non sempre questa distinzione è confermata, il legno dolce è quello delle conifere, mentre il legno duro è associato a latifoglie caduche. La differenza principale tra le due tipologie di legname non riguarda il potere calorifico inferiore, che per la legna si aggira attorno ai 13 MJ/kg, ma si riflette sulla densità (Iarioni, 2007).

LEGNO FORTE	LEGNO DOLCE
Acero	Conifere
Carpino	Pioppo
Cerro	Platano
Faggio	Salice
Frassino	(Ontano)
Fruttiferi	(Tiglio)
Gelso	
Leccio	
Noce	
Olivo	
Orniello	
Robinia	
Rovere	
Sughera	
(Betulla)	
(Castagno)	
(Olmo)	

Tabella 1 Classi di appartenenza dei legnami [47]

Ovviamente il legname impiegato per scaldare le abitazioni può appartenere indistintamente ad entrambe le categorie e senz'altro sarà caratterizzato da forma e dimensioni diverse (dai tondelli agli squarconi, dai ciocchi alla legna corta da stufa).

3.2.2 La filiera bosco-legna-energia

La legna è stata sfruttata fin dall'antichità come combustibile volto al riscaldamento delle abitazioni, grazie al suo elevato potere calorifico inferiore, alla larga diffusione in natura ed alla facilità di estrazione ed immagazzinamento. La caratteristica che però ha permesso di rivalutarla, anche in tempi più moderni e di cui sono sprovvisti i combustibili fossili è sicuramente quella di essere una forma rinnovabile di energia. Di fatti è possibile concepire una filiera *bosco-legna-energia*, che permette una volta estratta la risorsa di piantarne di nuova, pronta successivamente a soddisfare la richiesta di mercato. Ovviamente è possibile organizzare una tale filiera solo dove sia disponibile una fonte soddisfacente di biomassa legnosa, come un bosco, ma anche impianti di arboricoltura da legno o industrie di prima lavorazione del legno. Avere a disposizione la sorgente non è sufficiente, è necessario saperla gestire con maturità e coerenza, ovvero ipotizzare un'asportazione della biomassa accompagnata da un reintegro e assestamento forestale, il tutto guidato da piani messi a punto da tecnici competenti.

Se si ipotizza una filiera simile a quella descritta in precedenza, dove la fonte da cui estrarre il combustibile sia appunto il bosco, è necessario eseguire delle operazioni in una sequenza logica per poter ottenere il prodotto finale da immettere nel mercato. La fase iniziale sarà necessariamente quella di *taglio*. Questo primo stadio a sua volta può essere suddiviso in due steps (Bonoli, 2007):

- l'*abbattimento*, recisione al piede degli alberi e successivo atterramento. Tale operazione richiede l'utilizzo di molta manodopera che impiega strumenti per tagliare il fusto, come la motosega, ma anche per governare la direzione di caduta (cunei, leve, paranchi, ecc.);
- l'*allestimento*, consiste nella sramatura dei fusti e la depezzatura primaria, a volte affiancata ad una scortecciatura. Questi interventi vengono eseguiti mediante motosega, ma anche con l'ausilio di accetta e roncola.

Terminato lo stadio di taglio si passa a quello di *esbosco*, che consiste nel trasporto dei tronchi abbattuti sino al punto in cui vengono poi caricati su veicoli. Solitamente il luogo in questione viene chiamato in gergo *imposto*, un piazzale raggiungibile su strada. Per giungervi possono essere impiegati trattori, oppure si può sfruttare il peso del legno e farlo scendere per avvallamento (su piste, viali tagliafuoco o con sistemi a fune). Ovviamente per garantire la corretta applicazione di una filiera bosco-legna-energia, sarebbe necessario prevedere la

possibilità di effettuare l'esbosco delle piante intere e la sminuzzatura direttamente nel luogo di abbattimento, risparmiando in tempi e costi (Bonoli, 2007).

Le fasi successive saranno necessariamente quelle di *sminuzzatura* e di *stoccaggio*, che spesso vengono effettuate nel magazzino dove il legname rimarrà in attesa di essere venduto. Dall'imposto il legno tal quale verrà trasportato, solitamente attraverso un mezzo su strada, come un camion, oppure su rotaia accoppiato ad un mezzo su strada per raggiungere il luogo di immagazzinamento. Qui si procederà con una diminuzione della pezzatura del legname, solitamente in tronchetti di dimensioni variabili, in grado di essere poi sfruttati in differenti impianti di combustione (camini aperti, stufe tradizionali, camini chiusi, forni a legna, ecc.).

Terminata la riduzione delle dimensioni il materiale verrà stoccato, normalmente il luogo potrà essere all'aperto, isolando bene il legno dal terreno, al chiuso oppure esterno ma ben riparato dalle piogge. La fase di stoccaggio è accompagnata da quella di essiccamento all'aria, che garantisce, se correttamente eseguita, il giusto tenore di umidità, il quale varia a seconda della tipologia di legname, ad esempio vi può essere della legna con un valore di umidità $\leq 10\%$ mentre altra con tenore $>$ al 55% (UNI, 2010). È indispensabile che tale stadio venga eseguito in modo appropriato, poiché un valore troppo elevato di umidità inciderebbe negativamente sul potere calorifico inferiore, inoltre aumenterebbe il prezzo, dato che la legna viene venduta a peso (solitamente a quintali).

3.2.3 Normativa di riferimento

Come accennato precedentemente, la normativa di riferimento per i biocombustibili è rappresentata dalla serie UNI EN 14961. In particolare la norma UNI EN 14961-5 è quella che si riferisce alla legna da ardere per uso non industriale (*Firewood for non-industrial use*). In tale documento, elaborato sotto la competenza dell'ente CTI, federato all'UNI, vengono riportate alcune caratteristiche ed informazioni relative alla legna utilizzata come combustibile, rivolte principalmente al mercato domestico, dove la sensibilità verso la qualità del combustibile risulta probabilmente più elevata.

La norma in questione fornisce una prima definizione di combustibile legnoso:

Firewood: cut and split oven-ready fuelwood used in household wood burning appliances like stoves, fireplaces and central heating systems.

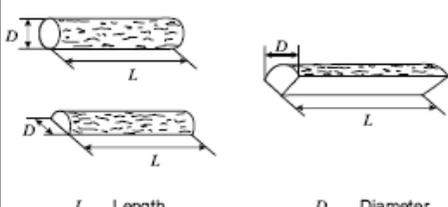
Legna da ardere: combustibili legnosi tagliati e già pronti per il forno utilizzati in applicazioni domestiche che bruciano legna come stufe, camini e sistemi di riscaldamento centralizzati.

Inoltre questo standard Europeo determina le classi di qualità del combustibile e le specificazioni per legna da ardere ad uso non industriale, prodotta esclusivamente dalle seguenti materie prime:

- 1.1.1 Alberi interi senza radici;
- 1.1.3 Fusti di legno;
- 1.1.4 Residui della ceppatura (piccoli rami, ecc.);
- 1.2.1 Residui di legno non trattati chimicamente.

I numeri associati ad ogni classe sono dei codici identificativi che sono stati forniti nella norma UNI EN 14961-1, dove si descrivono tutti i requisiti generali dei biocombustibili.

Di seguito vengono riportate due tabelle estrapolate rispettivamente dalla UNI EN 14961-1 e dalla UNI EN 14961-5. Nella prima si danno delle informazioni più generali riguardo il combustibile, mentre nella seconda si mostrano dettagli relativi a ciascuna classe di combustibile. Si nota una distinzione in tre categorie A1, A2 e B. Tale classificazione è stata eseguita sulla base di caratteristiche chimico-fisiche differenti ed in base alla tipologia d'impiego, di fatti mentre le prime due categorie individuano un combustibile utilizzabile in stufe e camini, la terza classe si riferisce a legna da ardere in boiler.

Master table	
Origin:	Woody biomass (1.1)
According to 6.1 and Table 1.	Wood species to be stated
Traded Form	Log wood, firewood
Dimensions (cm)	
Length (L) (maximum length of a single chop), cm	
L 20-	< 20 cm
L 20	20 cm ± 2 cm
L 25	25 cm ± 2 cm
L 30	30 cm ± 2 cm
L 33	33 cm ± 2 cm
L 40	40 cm ± 2 cm
L 50	50 cm ± 4 cm
L 100	100 cm ± 5 cm
L 100+	maximum value has to be stated
 <p style="text-align: center;">L Length D Diameter</p> <p style="text-align: center;">Figure 4 — Examples</p>	
Diameter (D) (maximum diameter of a single chop), cm	
D 2-	D < 2 cm ignition wood (kindling)
D 10	2 cm ≤ D ≤ 10 cm
D 12	4 cm ≤ D ≤ 12 cm
D 15	10 cm ≤ D ≤ 15 cm
D 20	10 cm ≤ D ≤ 20 cm
D 25	10 cm ≤ D ≤ 25 cm
D 35	20 cm ≤ D ≤ 35 cm
D 35+	D > 35 cm, maximum value to be stated
Moisture, M (w-% as received) CEN/TS 15149-1, CEN/TS 15149-2	
M10	≤ 10 %
M15	≤ 15 %
M20	≤ 20 %
M25	≤ 25 %
M30	≤ 30 %
M35	≤ 35 %
M40	≤ 40 %
M45	≤ 45 %
M55	≤ 55 %
M55+	> 55 % (maximum value to be stated)
Volume or weight, m ³ stacked or loose or kg as received	To be stated which volume is used when retailed (m ³ stacked or m ³ loose, kg) and/or packaged log woods weight.
Energy density, E ^b (kWh/kg or kWh/m ³ loose or stacked)	Recommended to be specified when retailed.
Proportion of split volume	No split (= mainly round wood) Split: more than 85 % of volume is split Mixture: split and round wood as a mixture
The cut-off surface	To be stated if the cut-off surface of log woods are even ^a and smooth ^a or ends of log woods are uneven
Mould and decay	If significant amount (more than 10 % of weight) of mould and decay exists it should be stated. In case of doubt particle density or net calorific value could be used as indicator.
^a Use of chainsaw is considered to be smooth and even.	
^b The energy density may be calculated according to Annex D on the basis of the bulk density and the net calorific value of the dry fuel. Example: For a firewood with a net calorific value on dry basis, E of 5,3 kWh/kg and an actual moisture content M _w of 15 w-%, the net calorific value on as received basis E _w is 4,43 kWh/kg. For a bulk density BD of 410 kg/stacked m ³ , the energy density E _w is 1 800 kWh/stacked m ³ .	

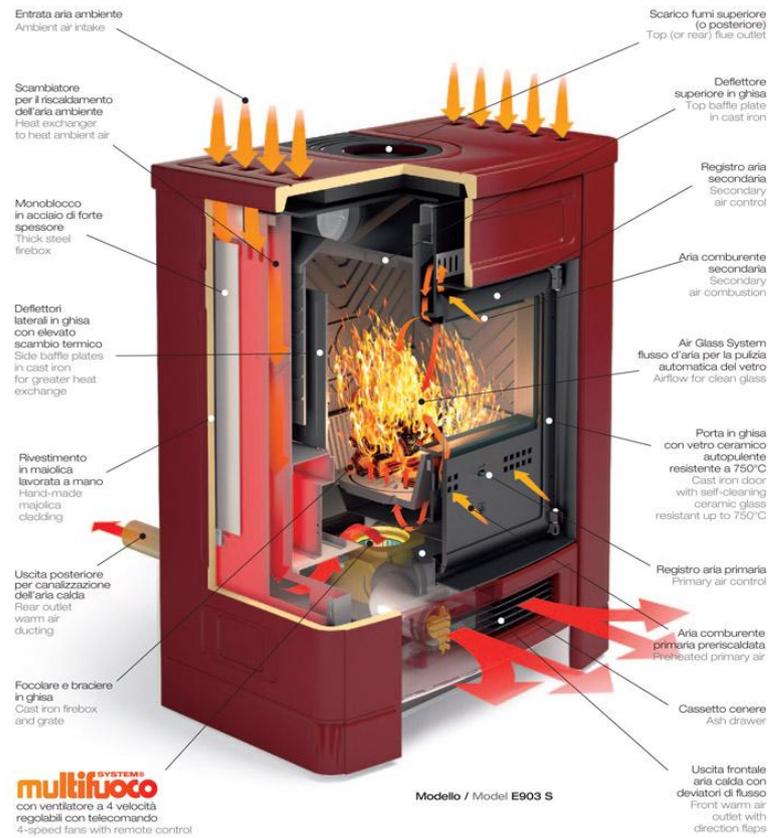
Property class/Analysis method	Units	A1	A2	B
Origin and source EN 14961-1		1.1.3 Stemwood 1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.1.1 Whole trees without roots 1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues	1.1.1 Whole trees without roots 1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues
Wood species ^a		To be stated		To be stated
Diameter, D ^{b,c}	cm	D2 ≤ 2 D5 2 < D ≤ 5 D10 5 ≤ D ≤ 10 D15 10 ≤ D ≤ 15 D15+ > 15 (actual value to be stated)		D15 ≤ 15 D15+ > 15 (actual value to be stated)
Length, L ^{b,d}	cm	L20 ≤ 20 L25 ≤ 25 L33 ≤ 33 L50 ≤ 50 L100 ≤ 100		L33 ≤ 33 L50 ≤ 50 L100 ≤ 100
Moisture, M ^{b,f} EN 14774-1, EN 14774-2	w-% wet basis	M20 ≤ 20 M25 ≤ 25		M25 ≤ 25 M35 ≤ 35
Moisture, U ^{b,f}	w-% dry basis	U25 ≤ 25 U33 ≤ 33		U33 ≤ 33 U54 ≤ 54
Volume or weight	m ³ stacked or m ³ loose or kg	To be stated which volume or weight is used when retailed		
Proportion of split volume	% of pieces	≥ 90 %	≥ 50 %	No requirements
The cut-off surface		Even and smooth ^e	No requirements	No requirements
Decay	% of pieces	No visible decay	≤ 5 %	If significant amount (more than 10 % of pieces) of decay exists it should be stated. In case of doubt particle density or net calorific value could be used as indicator.
Energy density, E ^g	kWh/m ³ loose or stacked kWh/kg	Recommended to be stated.		
Drying		Recommended to be stated, if firewood is dried by natural seasoning by ambient air or artificially by hot air.		
^a Wood species (e.g. spruce, birch, beech) can be stated by using the EN 13556 round and sawn timber nomenclature [6]. If firewood includes different wood species, the main wood species should be mentioned first.				
^b The selected diameter, length and moisture contents of firewood have to be stated.				
^c 85 % of the firewood should be kept in specified diameter property class. For stoves it is recommended to use firewood with a diameter less than 15 cm. D2 and D5 are recommended for cookers and as kindling (ignition wood).				
^d Length should be in the limits of ± 2 cm. It is allowed to have 15 % firewood shorter than requested length including the limit value.				
^e Use of chainsaw is considered to be smooth and even.				
^f Both determination of moisture contents have to be stated: M (w-%) on wet basis and U (w-%) on dry basis. Moisture content should not be less 12 w-% on wet basis (M) or 13,64 w-% on dry basis (U). Calculation from M to U-basis is shown in informative Annex A.				
^g The energy density (E) may be calculated according to Annex D in EN 14961-1:2010, on the basis of the bulk density (BD) and the net calorific value. Example: For a firewood with a net calorific value on dry basis of 19 MJ/kg (5,28 kWh/kg) and an actual moisture content of 15 w-%, the net calorific value on as received basis is 15,78 MJ/kg (4,38 kWh/kg). For a bulk density of 410 kg/stacked m ³ , the energy density (E) then is 6 480 MJ/stacked m ³ (1 800 kWh/stacked m ³).				

Tabella 2 Schede tecniche del combustibile legnoso [71; 72]

3.2.4 Descrizione generale dello scenario “stufa a legna”

Lo scenario in considerazione prevede la combustione di legna, solitamente forma e di tronchetti, in una stufa a legna, strumento presente nel mercato già da decenni, ma che solo recentemente ha raggiunto ottime prestazioni. Come già accennato in precedenza la legna è il combustibile più antico sfruttato dall'uomo e tuttora presenta una notevole risorsa, sia in città che fuori. Indubbiamente l'approvvigionamento del legname e il suo stoccaggio sono essenziali per garantire una copertura durante tutto il periodo invernale. Il metodo più comune per renderla facilmente immagazzinabile è quello di tagliarla in ceppi e disporli in opportune cataste.

Di seguito è riportata una sezione di una comune stufa a legna (fonte: www.piazzetta.it). Attraverso tale schema si riesce a comprendere come avviene il processo di combustione; inoltre è possibile cogliere quali sono i comparti che compongono tale strumento. Per la stufa a legna è difficile immaginare un carico automatico del combustibile, pertanto tali strumenti sono predisposti per il carico manuale del legname, aprendo direttamente il vetro posizionato di fronte la camera di combustione. Il focolare è costituito da un braciere in ghisa; ivi si posizionano i tronchetti e grazie all'immissione di aria primaria dal basso ed aria secondaria dall'alto è possibile il processo di combustione. Solitamente le stufe a legna sono dotate di un sistema frontale con il quale regolare il flusso di aria primaria da immettere nella camera. L'utilizzo sempre crescente di queste stufe è dovuto in gran parte alla capacità di riscaldare l'ambiente in poco tempo. Questa funzione è garantita da uno scambiatore di calore in contro corrente che aspirando l'aria nella stanza la riscalda con i fumi di combustione. L'aspirazione può essere naturale o forzata (Figura 8). Nel primo schema la stufa è dotata di un sistema *multifuoco* (kit opzionale), che riesce ad aspirare l'aria dall'ambiente esterno, incanalarla controcorrente ai fumi di combustione e distribuirli direttamente nelle stanze, mediante un sistema di canali coibentati e deviatori di flusso (bocchette per l'uscita di aria calda). Queste stufe presentano un rivestimento in ceramica, che, oltre ad ornare lo strumento, consente una lenta dissipazione del calore e al tempo stesso evita di ustionarsi al contatto.



Uscita dell'aria calda
Warm air outlet

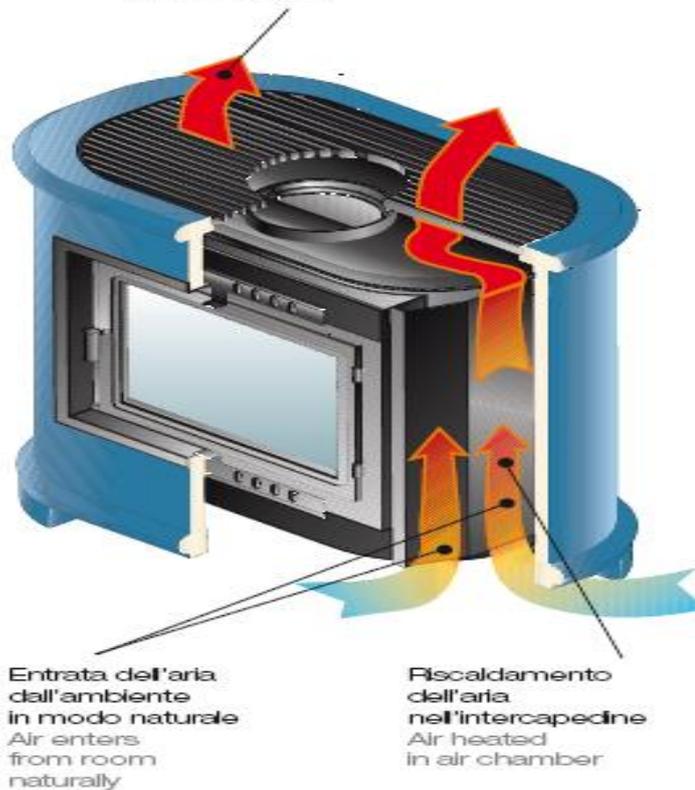


Figura 8 Sezione e funzionamento di una stufa a legna, a diffusione forzata e naturale (fonte: www.piazzetta.it)

3.3 Il pellet

3.3.1 Classificazione

Il pellet, materiale appartenente alla classe dei biocombustibili, nasce nel 1973 in Idaho negli Stati Uniti con lo scopo di essere utilizzato per impiego industriale, grazie al suo alto potere calorifico che lo rende paragonabile ai combustibili fossili fluidi (Bonoli, 2007). In particolare il termine pellet è stato introdotto per indicare esclusivamente la forma esteriore e commerciabile di tale combustibile densificato, che può essere prodotto partendo da diversi tipi di materia prima. In questo studio limiteremo la nostra attenzione esclusivamente al *pellet da legno*, forma più commercializzata a livello europeo. Questo aspetto è dovuto all'elevata disponibilità di legno ed è stato ulteriormente confermato dai molteplici esperimenti condotti in passato su *pellet da biomasse verdi*. Questi hanno sempre fornito esiti negativi, poiché tale forma alternativa di pellet è risultata poco competitiva (elevato prezzo della materia prima), molto energivora durante la fase necessaria di essiccazione, con basso P.C.I. (Potere Calorifico Inferiore) e con un maggiore quantitativo di ceneri, probabilmente dovuto alla rimozione delle sostanze più volatili nella fase di essiccazione (Probio CTI, 2004).

3.3.2 Filiera di produzione del pellet

Generalmente il termine *filiera del pellet da legno* viene utilizzato per inglobare tutte le operazioni e gli impianti che caratterizzano le singole fasi, dall'approvvigionamento della biomassa alla sua trasformazione in pellet (Probio CTI, 2004). Normalmente una filiera completa racchiude molteplici stadi che si susseguono l'un l'altra in un concatenamento che ne determina una forte interconnessione. Nella realtà impianti o casi particolari possono imporre delle soluzioni differenti e/o più semplici. Di seguito vengono elencate e descritte sommariamente quelle che sono senz'altro le fasi più comuni.

- *Fase di esbosco*: in cui viene prelevata la materia prima.
- *Fase di trasporto e stoccaggio intermedio della biomassa*: trasporto del tal quale fino ad un punto di stoccaggio intermedio (imposto)
- *Fase di trasporto della biomassa dall'imposto all'impianto di pellettizzazione*
- *Fase di pellettizzazione*
- *Fase di distribuzione dall'impianto di pellettizzazione al consumatore finale*

Tra queste la fase più complessa e che merita una maggior descrizione è sicuramente quella di pellettizzazione, la quale può essere suddivisa a sua volta in sottoprocessi dai quali scaturisce la produzione del pellet.

Inizialmente la biomassa viene caricata con una *trattrice* in una tramoggia di acciaio, che la contiene fino a quando non viene inviata mediante sistema automatizzato ad un macinatore. Ivi, per mezzo di un *rotore a coltelli*, subisce una macinazione primaria, che ha lo scopo di ridurre il volume e renderla omogenea in dimensioni. Ovviamente la biomassa, prima di essere convogliata alla fase di macinazione, dovrà subire una deferrizzazione con lo scopo di eliminare possibili corpi metallici in grado di rovinare le macchine. Le fasi successive necessitano che il materiale da trattare non abbia un quantitativo di umidità troppo elevato, per questo motivo è necessaria un'essiccazione, effettuata mediante *essiccatoi rotativi* (equicorrente o controcorrente). In tale fase si elimina il surplus di acqua e viene dato modo alla lignina, contenuta nella biomassa, di poter svolgere il ruolo legante (Probio CTI, 2004). Terminata la fase di essiccamento si procede con la macinazione secondaria, eseguita mediante *molino a martelli*, in grado di produrre un materiale delle dimensioni di 3 mm, sufficienti a garantire una corretta alimentazione alla pellettatrice. Prima di poter inviare tale materiale alla macchina per produrre pellet sarà necessario un condizionamento del materiale per effettuare un'estrusione nelle condizioni migliori possibili. Ciò si ottiene esponendo la biomassa per tempi variabili a condizioni diverse di temperature ed umidità; uno dei metodi più utilizzati, per praticità ed economicità, è quello del *vapore acqueo secco*, con cui si ammorbidiscono le fibre legnose e si conferisce una maggior compattezza al pellet finale grazie alla liberazione della lignina, che aumenta il legame tra le particelle. La fase di condizionamento può essere caratterizzata anche dall'eventuale aggiunta di alcuni additivi quali grasso e melassa che migliorano la qualità dei granuli e stabilizzano il materiale (Probio CTI, 2004). terminate queste fasi di pretrattamento, volte all'ottenimento di un prodotto privo di polvere, con superficie esterna lucida e priva di incrinature, il materiale viene convogliato alla fase di pellettizzazione che avviene in pellettatrici. Questi strumenti possono essere di due tipologie, che si differenziano una dall'altra per disposizione e forma della trafilata.

- Macchine pellettizzatrici a trafilata cilindrica verticale (o ad anello): questa categoria può essere suddivisa ulteriormente in altre due classi quelle con *rulli di pressione interni* e quelle con i *rulli di pressione esterni*. Dai due nomi si capisce immediatamente che nel primo caso la biomassa viene pressata all'interno, mediante rulli mobili zigrinati, tranciata da opportuni coltelli fissi che lasciano cadere il pellet in una tramoggia di carico. Nel secondo apparecchio la pressatura della biomassa avviene sulla superficie esterna della pellettatrice e il pellet verrà allontanato con condotte di aspirazione frontale.

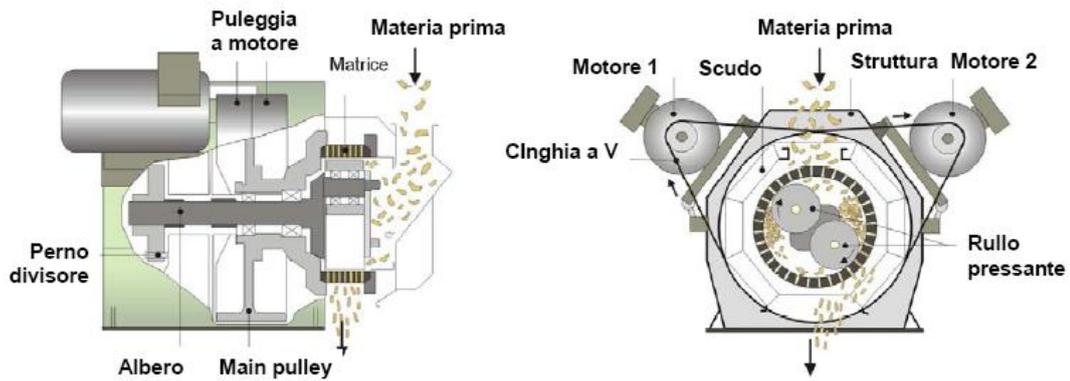


Figura 9 Pellettizzatrici a trafila cilindrica verticale [45]

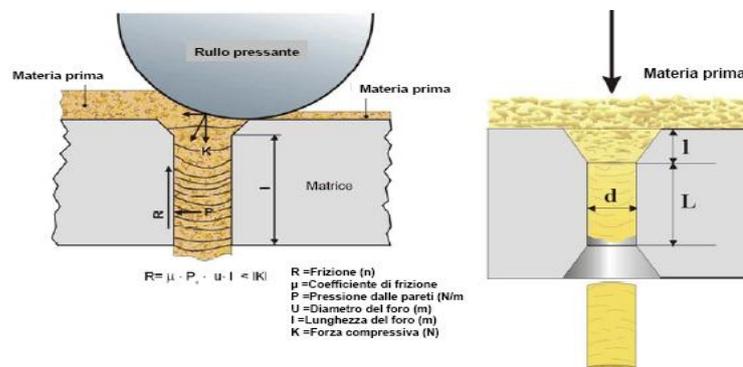


Figura 10 meccanismo di estrusione del pellet [45]

- Macchine pellettizzatrici a trafila piana: in questo caso la disposizione degli elementi è differente dalla precedente, poiché essi sono posti lungo l'albero longitudinale e si possono distinguere tre parti: la testa, dove ha luogo l'alimentazione e lo schiacciamento, la tranciatura ed espulsione e il motore. L'estrusione del pellet in tale macchina viene effettuata su di una trafila piana dove agisce un numero variabile di rulli. Tale operazione può essere caratterizzata dalla rotazione dei rulli e dall'immobilità della trafila o viceversa. Il materiale viene tranciato mediante coltelli posizionati al di sotto del piano e viene espulso mediante delle palette.

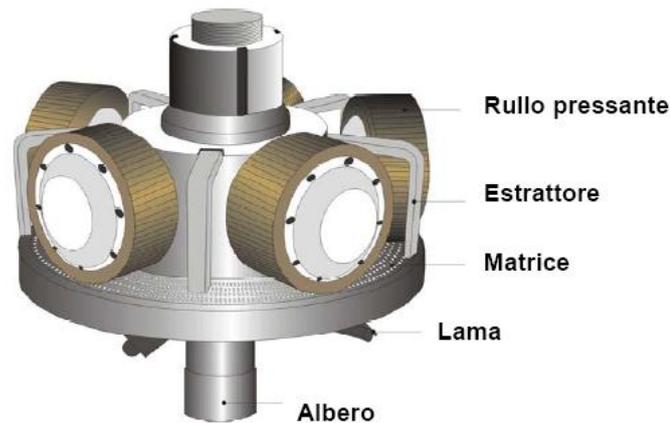


Figura 11 schema di una matrice piana [45]

Una volta terminata la fase di estrusione, il pellet risulta caldo ed elastico, perciò per ultimare la sua preparazione è necessario un *raffreddamento* mediante ventilazione (controcorrente o trasversale) con aria alla temperatura ambiente. Tale passaggio non serve solamente a ridurre la temperatura, ma stabilizza il prodotto che così acquisisce maggior durezza e mantiene le sue caratteristiche per più tempo. A questo punto il materiale subisce una vagliatura (mediante *vibrovaglio*), per eliminare il pellet non integro (contenente polvere) ed inviare il restante alla fase di stoccaggio, che può avvenire principalmente in silos o sacchi. Differentemente da altri combustibili, il pellet non presenta grandi problemi nello stoccaggio, poiché occupa uno spazio ridotto, può mantenere a lungo integre le sue proprietà e se ben pulito dalla polvere non si hanno possibilità di incendi (Probio CTI, 2004).

Merita attenzione anche la fase dedicata alla distribuzione del prodotto finito al consumatore. Generalmente questo combustibile può essere venduto in modi molto diversi, ma quelli preferiti dagli acquirenti sono senz'altro la vendita in piccoli sacchi (dai 16 ai 40 kg) e la vendita sfusa, che evita ulteriori trasporti che possono danneggiarlo, ma necessita della disponibilità di un camion ribaltabile (Hansen et al., 2009).

3.3.3 Normativa di riferimento

Nel paragrafo introduttivo si era accennato alla normativa europea sul settore biocombustibili, in grado di fornire indicazioni per affrontare meglio questo tema. Di questa serie di norme ben tre sono rivolte al pellet, ma attualmente l'unica pubblicata è la UNI EN 14961-1 *Requisiti generali* la quale fornisce una classificazione generale, in quattro categorie, dei biocarburanti solidi basata sulla loro origine:

- biomassa legnosa
- biomassa erbacea

- biomassa da frutto
- tagli e miscele

Inoltre espone attraverso delle griglie le caratteristiche tecniche di ogni combustibile, tra cui quella per il pellet, che viene riportata qui sotto in Figura 11. Bisogna sottolineare che questa normativa non stabilendo vincoli tra le varie proprietà, verrà applicata maggiormente a pellet per utilizzo industriale. Le altre due norme, la UNI EN 14961-2 e la UNI EN 14961-6, non ancora pubblicate, poiché non definitivamente ultimate, sono le cosiddette norme per il pellet ad uso non industriale, che prevedono l'utilizzo del pellet per il riscaldamento domestico oppure in attività commerciali più piccole (The Bioenergy International, 2010).

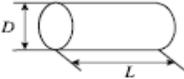
La norma europea UNI EN 14961-2, approvata in gennaio 2011, definisce le caratteristiche di qualità del prodotto prevedendo una classificazione delle biomasse legnose che possono essere impiegate come materia prima per la produzione di pellet, con la conseguente individuazione di tre categorie di combustibile:

- Classe A1: corrisponde alla qualità più elevata caratterizzata da un contenuto di ceneri massimo dello 0,7%;
- Classe A2: corrisponde alla qualità intermedia con un contenuto di ceneri dell'1,5%;
- Classe B: la categoria inferiore con un quantitativo massimo di ceneri del 3,5%, che può essere prodotta da segatura e corteccia (principalmente per grandi impianti di combustione).

Inoltre, per ogni classe di appartenenza vengono riportati dati relativi alla qualità e composizione del pellet, necessari ai fini dell'ottenimento della certificazione. Di fatti ultimamente è sempre più pronunciata l'attenzione del mercato, e conseguentemente dei consumatori, verso prodotti certificati. Ciò non è limitato ai soli beni alimentari, ma ampio interesse è rivolto verso tutti gli articoli di consumo, per i quali l'acquirente richiede sempre più controlli e qualità. Di fatti, la continua espansione del mercato comporta sempre più spesso la commercializzazione di merci provenienti da diversi Stati, che durante la fase di estrazione di materie prime e produzione non sempre rispettano le normative vigenti. Ciò si traduce in una scarsa qualità del prodotto finale, che spesso ha delle ripercussioni negative sull'ambiente e sulla salute degli esseri viventi.

Per questo motivo è nato da poco tempo il sistema di certificazione per il pellet *EN plus*, basato sulla norma EN 14961-2, che ha l'obiettivo di assicurare il nuovo standard europeo attraverso la garanzia di conformità del prodotto commercializzato. Ciò permette di raggiungere una certa trasparenza e tracciabilità nella filiera, assicurate da una

documentazione interna e da numeri di identificazione assegnati ai produttori (che devono anche indicare il quantitativo di materia prima certificata utilizzata) e distributori di pellet. In questo modo il sistema è in grado di assicurare che i criteri di qualità vengano rispettati in ogni fase, dalla produzione/ricezione delle materie prime fino alla consegna al consumatore finale, individuando le criticità della filiera ed apportando correzioni (AIEL, 2011[2]).

Master table	
Origin: According to 6.1 and Table 1	Woody biomass (1); Herbaceous biomass (2); Fruit biomass (3); Blends and mixtures (4).
Traded Form (see Table 2)	Pellets
<p><i>L</i> Length <i>D</i> Diameter</p>  <p>Figure 3 — Dimensions (mm)</p>	
Dimensions (mm)	
Diameter (<i>D</i>) and Length (<i>L</i>) ^a	
D 06	6 mm ± 1,0 mm and 3,15 ≤ <i>L</i> ≤ 40 mm
D 08	8 mm ± 1,0 mm, and 3,15 ≤ <i>L</i> ≤ 40 mm
D 10	10 mm ± 1,0 mm, and 3,15 ≤ <i>L</i> ≤ 40 mm
D 12	12 mm ± 1,0 mm, and 3,15 ≤ <i>L</i> ≤ 50 mm
D 25	25 mm ± 1,0 mm, and 10 ≤ <i>L</i> ≤ 50 mm
Moisture, <i>M</i> (w-% as received) EN 14774-1, EN 14774-2	
M10	≤ 10 %
M15	≤ 15 %
Ash, <i>A</i> (w-% of dry basis) EN 14775	
A0.5	≤ 0,5%
A0.7	≤ 0,7%
A1.0	≤ 1,0%
A1.5	≤ 1,5 %
A2.0	≤ 2,0 %
A3.0	≤ 3,0 %
A5.0	≤ 5,0 %
A7.0	≤ 7,0 %
A10.0	≤ 10,0 %
A10.0+	> 10,0 %
Mechanical durability, <i>DU</i> (w-% of pellets after testing) EN 15210-1	
DU97.5	≥ 97,5 %
DU96.5	≥ 96,5 %
DU95.0	≥ 95,0 %
DU95.0-	< 95,0 % (minimum value to be stated)
Amount of fines, <i>F</i> (w-%, < 3,15 mm ^b) after production when loaded or packed, CEN/TS 15149-1	
F1.0	≤ 1,0 %
F2.0	≤ 2,0 %
F3.0	≤ 3,0 %
F5.0	≤ 5,0 %
F5.0+	> 5,0 % (maximum value to be stated)
Additives (w-% of pressing mass) ^c	Type and content of pressing aids, slagging inhibitors or any other additives have to be stated
Bulk density (BD) as received (kg/m ³) EN 15103	
BD550	≥ 550 kg/m ³
BD600	≥ 600 kg/m ³
BD650	≥ 650 kg/m ³
BD700	≥ 700 kg/m ³
BD700+	> 700 kg/m ³ (minimum value to be stated)
Net calorific value as received, <i>Q</i> (MJ/kg or kWh/kg)	Minimum value to be stated EN 14918

Normative / informative	Sulphur, <i>S</i> (w-% of dry basis) CEN/TS 15289		
	S0.02	≤ 0,02 %	Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2; 2.2.2; 3.2.2) or if sulphur containing additives have been used.
	S0.05	≤ 0,05 %	
	S0.08	≤ 0,08 %	
	S0.10	≤ 0,10 %	
	S0.20	≤ 0,20 %	
	S0.20+	> 0,20 % (maximum value to be stated)	Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)
	Nitrogen, <i>N</i> (w-% of dry basis) CEN/TS 15104		
	N0.3	≤ 0,3 %	Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2; 2.2.2; 3.2.2)
	N0.5	≤ 0,5 %	
N1.0	≤ 1,0 %		
N2.0	≤ 2,0 %		
N3.0	≤ 3,0 %		
N3.0+	> 3,0 % (maximum value to be stated)	Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)	
Chlorine, <i>Cl</i> (w-% of dry basis) CEN/TS 15289			
Cl0.02	≤ 0,02 %	Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2; 2.2.2; 3.2.2)	
Cl0.03	≤ 0,03 %		
Cl0.07	≤ 0,07 %		
Cl0.10	≤ 0,10 %		
Cl0.10+	> 0,10 % (maximum value to be stated)		Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)
Informative: Ash melting behaviour (°C) CEN/TS 15370-1		Deformation temperature, DT should be stated	

^aAmount of pellets longer than 40 mm (or 50 mm) can be 5 w-%. Maximum length for classes D06, D08 and D10 shall be < 45 mm.

^bFines shall be determined by using method CEN/TS 15149-1.

^cThe maximum amount of additive is 20 w-% of pressing mass. Type stated (e.g. starch). If amount is greater, then raw material for pellet is blend.

Tabella 3 Schede tecniche del pellet [71]

	Property class /Analysis method	Unit	A1	A2	B
Normative	Origin and source EN 14961-1		1.1.3 Stemwood 1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.1.1 Whole trees without roots 1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues 1.1.6 Bark 1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2 By-products and residues from wood processing industry 1.3 Used wood
	Diameter, D ^a and Length L ^b , prEN16127	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40
	Moisture, M, EN 14774-1, EN 14774-2	as received, w-% wet basis	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Ash, A, EN14775	w-% dry	A0.7 ≤ 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Mechanical durability, DU, EN 15210-1	as received, w-%	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Fines at factory gate in bulk transport (at the time of loading) and in small (up to 20 kg) and large sacks (at time of packing or when delivering to end-user), F, prEN 15210-1	w-% as received	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Additives ^c	w-% dry	≤ 2 w-% Type and amount to be stated	≤ 2 w-% Type and amount to be stated	≤ 2 w-% Type and amount to be stated
	Net calorific value, Q, EN 14918	as received, MJ/kg or kWh/kg	Q16.5, 16,5≤Q≤19 or Q4.6, 4,6≤Q≤5,3	Q16.3, 16,3≤Q≤19 or Q4.5, 4,5≤Q≤5,3	Q16.0, 16,0≤Q≤19 or Q4.4, 4,4≤Q≤5,3
	Bulk density, BD, EN 15103	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Nitrogen, N, prEN 15104	w-% dry	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Sulphur, S, prEN 15289	w-% dry	S0.03 ≤ 0,03	S0.03 ≤ 0,03	S0.04 ≤ 0,04
	Chlorine, Cl, prEN 15289	w-% dry	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsenic, As, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, Cd, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chromium, Cr, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Copper, Cu, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Lead, Pb, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Mercury, Hg, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nickel, Ni, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zinc, Zn, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Informative: Ash melting behavior ^d , prEN15370	°C	Should be stated	Should be stated	Should be stated	

^a Actual diameter class (D06, D08) of pellets to be stated.

^b Amount of pellets longer than 40 mm can be 1 w-%. Maximum length shall be < 45 mm.

^c Type of additives to aid production, delivery or combustion (e.g., pressing aids, slagging inhibitors or any other additives like starch, corn flour, potato flour, vegetable oil,...). Also additives which are used after production, before unloading to end-user storages, shall be stated similarly (type and amount).

Tabella 4 Le tre classi di pellet [36]

3.3.4 Descrizione generale dello scenario “stufa a pellet”

Lo scenario che è stato modellato prevede la combustione del pellet in opportune stufe alimentate esclusivamente con tale combustibile. Queste apparecchiature offrono un metodo alternativo al più tradizionale camino o stufa a legna, per riscaldare gli ambienti domestici. L'utilizzo del pellet prevede alcuni vantaggi macroscopici rispetto alla legna, il più immediato dei quali riguarda la comodità nello stoccaggio. Di fatti, oltre alla possibilità di deposito per un periodo molto più lungo senza subire deterioramenti, esso occupa uno spazio circa pari ad 1/3 rispetto ai classici tronchetti da camino (Probio CTI, 2004) e di conseguenza risulta di più facile immagazzinamento. Questo è uno dei motivi per cui le stufe a pellet stanno prendendo sempre più piede nella realtà italiana, in particolare nelle abitazioni di città, dove la lontananza da luoghi di approvvigionamento della legna e l'impossibilità dello stoccaggio di quest'ultima rendono improbabile la presenza di un camino tradizionale o di una stufa a legna. Di seguito è riportata una sezione di una comune stufa a pellet (fonte: www.piazzetta.it), che permette di individuare i comparti di cui è composta ed i materiali utilizzati per la sua realizzazione. Lo strumento prevede in alto un vano di stoccaggio del combustibile, il quale viene alimentato gradualmente da un motore nella zona di combustione. Il focolare è costituito da un braciere in ghisa, zona centrale della sezione, dove avviene il processo di combustione grazie all'aspirazione di aria primaria dal basso ed aria secondaria dall'alto, necessaria per completare il processo. Anche in questo caso la stufa è dotata di un sistema multi fuoco (per maggiori dettagli si rimanda alla descrizione della stufa a legna). Come per la stufa a legna il rivestimento solitamente è in ceramica.

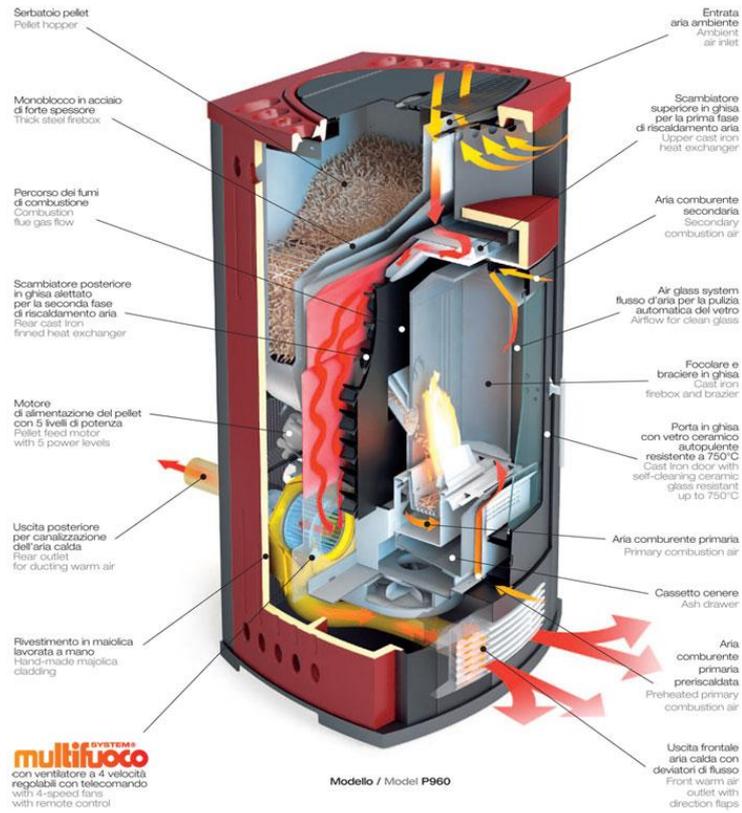


Figura 12 Sezione e funzionamento di una stufa a pellet (fonte: www.piazzetta.it)

4. SCENARI DI RISCALDAMENTO DOMESTICO ALTERNATIVI SCELTI PER CONFRONTO

4.1 Introduzione generale agli scenari di riscaldamento domestico alternativi

Ovviamente, oltre alle possibili ricadute ambientali dovute alle emissioni gassose, è bene sottolineare che le biomasse, soprattutto se derivano da colture dedicate, richiedono ampie superfici, un elevato quantitativo di fertilizzante e spesso risentono della stagionalità. Per questi motivi lo studio non è stato limitato esclusivamente all'indagine delle fonti di riscaldamento domestico che sfruttano biocombustibili, ma per poter ottenere un ulteriore confronto sono stati estesi i confini del sistema investigando il "comportamento" di altre tecnologie. Dopo una dettagliata indagine dei metodi di riscaldamento più in uso nella realtà italiana, la nostra attenzione si è rivolta verso tecnologie aventi principi di funzionamento totalmente diversi fra loro. Le metodologie che sono state selezionate sono: il boiler a gas, il pannello solare termico e la pompa di calore. Le motivazioni che hanno fatto ricadere la scelta su questi metodi alternativi di riscaldare le abitazioni sono principalmente tre:

1. la volontà di analizzare e confrontare una tecnologia standard e consolidata nella abitazioni italiane, boiler a gas;
2. la necessità di porre a confronto sistemi di riscaldamento a biomassa con un'altra tecnologia che sfrutti energia rinnovabile, come il pannello solare termico;
3. la volontà di indagare una fonte di riscaldamento alternativa, atipica, ma che sarà protagonista nello scenario futuro, quale la pompa di calore.

Di seguito vengono riportate le descrizioni in dettaglio del principio di funzionamento delle tecnologie studiate.

4.2 Boiler a gas

4.2.1 Tecnologia utilizzata

Nella terminologia comune con il termine Generatore di vapore o Caldaia (o Boiler) si intende il dispositivo che, realizzando la conversione dell'energia chimica di un combustibile (solido, liquido o gassoso) in energia termica, attraverso una reazione chimica esotermica di combustione con aria (comburente), permette il riscaldamento, per mezzo di uno scambiatore di calore, di un fluido termovettore, solitamente acqua. Generalmente un generatore di vapore è costituito dal bruciatore, che permette la reazione di combustione tra combustibile e comburente, e la caldaia, la parte adibita allo scambio termico (contributo radiativo per irraggiamento diretto della fiamma e convettivo, attraverso i prodotti di combustione che lambiscono la parete dello scambiatore) con il fluido termovettore. Cedendo un po' di calore all'acqua, che pertanto cambia di fase, i fumi prodotti dalla combustione, riducono la loro temperatura, che comunque è sensibilmente superiore a quella ambiente. L'elevata temperatura (nel caso della combustione del gas naturale si raggiungono i 140°C) è necessaria per evitare condense acide e di vapor d'acqua, oltre a favorire un corretto tiraggio in grado di garantire un buon effetto camino (Denticet et al., 1999). Ovviamente, nonostante si lavori sempre in eccesso di aria, i fumi conterranno sempre una certa quantità di incombusti, cioè di combustibile non reagito. Di seguito viene riportato uno schema di un tipico generatore di vapore.

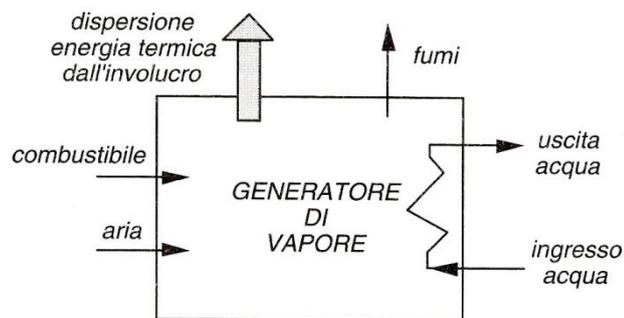


Figura 13 Flussi di massa ed energia di un generatore di vapore [25]

4.2.2. Combustibile

Comunemente il combustibile che viene impiegato nei generatori di vapore è il gas metano, poiché oltre a produrre un'elevata quantità di calore per massa unitaria (P.C.I. 8,3kWh/kg), è facilmente distribuibile nelle nostre abitazioni attraverso una fitta rete di condutture.

Esso è il principale componente del gas naturale, una miscela di etano, propano, butano, pentano, CO₂, composti azotati ed H₂S, e come tale appartiene alla classe dei combustibili

fossili, sostanze sviluppatesi in milioni di anni grazie dalla trasformazione in forme molecolari sempre più stabili e ricche di carbonio (carbogenesi) della sostanza organica, seppellitasi sottoterra nel corso delle ere geologiche.

Prima di poter essere distribuito ai consumatori finali, il gas naturale dovrà essere trattato per eliminare tutte le impurità in esso contenute. Ciò avviene attraverso un processo meno complesso rispetto a quello del petrolio, che porta all'ottenimento di un prodotto incolore ed inodore; perciò, per motivi di sicurezza, prima di essere convogliato nelle nostre abitazioni dovrà subire una fase di addizione di mercaptano, un tiolo che conferisce al combustibile un odore pungente e ben percepibile (Armaroli & balzani, 2011).

Il gas naturale è conosciuto da millenni, ma la prima perforazione intenzionale per la sua estrazione avvenne nel 1821 a Fredonia (New York), ben 38 anni prima rispetto alla scoperta del primo giacimento di petrolio. Purtroppo, appartenendo alla famiglia dei combustibili fossili risulta esauribile e la sua rigenerazione, pur se fisicamente possibile, risulta tecnicamente impossibile per garantirci grandi riserve. Ciò è dovuto all'impossibilità di chiudere il ciclo di produzione e consumo di tali combustibili, poiché se per la loro formazione sono stati necessari milioni di anni, sono bastati solo 150 anni per ridurne drasticamente le riserve conosciute. Queste problematiche, difficili da prevedere e da gestire, hanno accresciuto l'interesse nell'opinione pubblica verso studi che riguardano il tempo di esaurimento delle riserve, la ricerca e lo studio di nuovi giacimenti. Ciò ha portato alla nascita di molte associazioni che ad oggi stimano statisticamente le riserve energetiche, e non solo, prevedendone il picco massimo di produzione (Teoria di Hubbert). Inoltre un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda la distribuzione dei giacimenti, i quali spesso si trovano in Paesi che non sono grandi consumatori, a causa di economie ancora poco sviluppate, che pertanto divengono dei produttori. Ciò si ripercuote negativamente sulla indipendenza energetica dei paesi importatori di risorse, che dovranno sempre essere soggetti a prezzi e tempi imposti dalla situazione geo-politica dei paesi esportatori.

Produzione	Consumo
USA 611,0	USA 683,4
Russia 588,9	Russia 414,1
Canada 159,8	Iran 136,9
Iran 138,5	Cina 109,0
Qatar 116,7	Giappone 94,5
Norvegia 106,4	Canada 93,8
Cina 96,8	Gran Bretagna 93,8
Arabia Saudita 83,9	Arabia Saudita 83,9
Indonesia 82,0	Germania 81,3
Algeria 80,4	Italia 76,1
Paesi Bassi 70,5	Messico 68,9
...	India 61,9
Italia 7,6	...

Tabella 5 Produzione e consumo di gas naturale in miliardi di m³/anno [16]

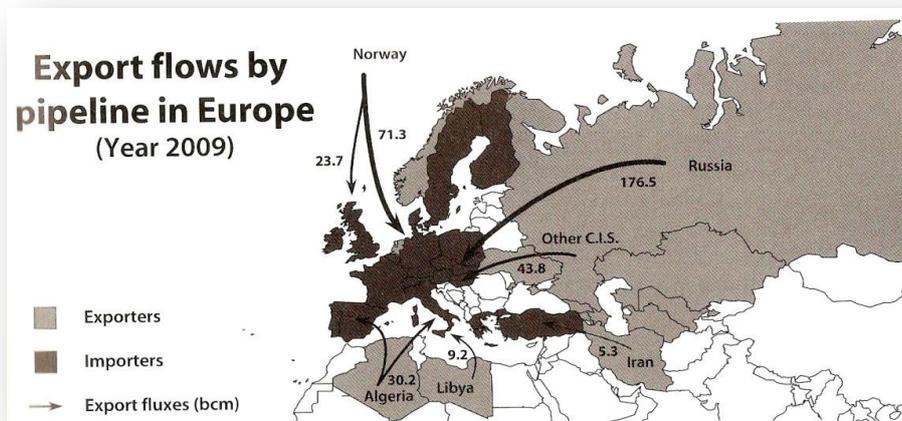


Figura 14 Flussi in ingresso verso l'Europa di gas naturale attraverso condutture nel 2009 [16]

La Tabella 5 e la Figura 14 confermano quanto detto sopra, cioè non sempre i grandi produttori sono grandi consumatori. L'esempio lampante è quello dell'Italia, che nella colonna dei produttori viene riportata per comodità di confronto in ultima posizione, anche se la sua reale collocazione sarebbe molto più in basso, mentre in quella dei consumatori è realmente nella terzultima riga. Di fatti il nostro Paese ha raggiunto il picco di produzione di 20 miliardi di m³ nel 1994, da allora essa è calata drasticamente, mentre in controcorrente è andato il consumo, che dal 2000 al 2010 è passato dai 64,9 ai 76,1 miliardi di m³ per anno. Questo fenomeno è riconducibile a quello che è lo scenario energetico italiano, nel quale si sta

puntando ad uno sfruttamento maggiore del gas naturale, non solo a scopi termici, ma anche per la produzione di energia elettrica e trasporti, a scapito del petrolio e derivati. L'andamento è riportato nella Tabella 6 mostrata di seguito.

2000 (dati storici)						
	Rinnovabili	Carbone	Gas	Petrolio	Energia elettrica	Totale
<i>Produzione</i>	12,4	0,3	13,7	4,6		31,0
<i>Importazione</i>	0,5	13,2	47,4	109,8	9,9	180,8
<i>Esportazione</i>	0,0	0,1	0,0	21,2	0,1	21,4
Consumo interno lordo	12,9	12,9	58,4	91,5	9,8	185,4

2010						
	Rinnovabili	Carbone	Gas	Petrolio	Energia elettrica	Totale
<i>Produzione</i>	17,1	0,1	10,0	5,0	0,0	32,1
<i>Importazione</i>	0,3	15,6	65,3	91,7	15,3	188,3
<i>Esportazione</i>		0,2	0,0	11,0	0,0	11,3
Consumo interno lordo	17,4	15,5	75,3	85,7	15,3	209,2

2020						
	Rinnovabili	Carbone	Gas	Petrolio	Energia elettrica	Totale
<i>Produzione</i>	19,1	0,1	6,0	4,9	0,0	30,1
<i>Importazione</i>	0,0	17,7	86,6	83,6	14,2	202,2
<i>Esportazione</i>		0,3	0,0	5,5	0,0	5,8
Consumo interno lordo	19,1	17,5	92,6	83,0	14,2	226,5

2030						
	Rinnovabili	Carbone	Gas	Petrolio	Energia elettrica	Totale
<i>Produzione</i>	19,2	0,1	6,0	4,5	0,0	29,8
<i>Importazione</i>	0,0	20,6	94,7	77,8	12,7	205,8
<i>Esportazione</i>		0,3	0,0	0,2	0,0	0,5
Consumo interno lordo	19,3	20,4	100,7	82,1	12,7	235,2

Tabella 6 Bilancio di sintesi dell'energia in Italia nello scenario tendenziale 2000-2030 (fonte: http://www.iostudioliguria.it/iostudio/DTS_GENERALE/20060928/immagini/Scenari_energetici.pdf)

Altre motivazioni che possono spingere ad un crescente impiego come combustibile sono la non tossicità per inalazione, in caso di fughe, ed il fatto di produrre durante il processo di combustione un quantitativo di CO₂ inferiore del 26% rispetto al petrolio e del 41% rispetto al carbone, tenendo conto inoltre che l'anidride carbonica liberata avrà un potenziale di riscaldamento globale (GWP) 21 volte inferiore rispetto a quello del gas naturale disperso in ambiente.

4.3 Solare Termico

4.3.1 Energia dal Sole

La civiltà moderna è figlia del carbon fossile: l'uomo se n'è servito e se ne serve con crescente avidità e spensierata prodigalità per la conquista del mondo. La terra ne possiede ancora enormi giacimenti ma essi non sono inesauribili. Bisogna pensare all'avvenire.[...]

Se la nostra civiltà nera e nervosa, basata sul carbone, sarà seguita da una civiltà più tranquilla, basata sull'utilizzo dell'energia solare, non ne verrà certo un danno al progresso e alla felicità umana. [...]

Selve di tubi e serre di ogni dimensioni s'innalzeranno al Sole nelle zone desertiche e in questi apparecchi trasparenti si compiranno quei processi fotochimici di cui fino allora le piante avevano il segreto, ma che l'industria umana avrà saputo carpire: essa saprà farli ben altrimenti fruttare, perché la natura non ha fretta, mentre l'umanità è frettolosa. E se giungerà in un lontano avvenire il momento in cui il carbon fossile sarà esaurito, non per questo la civiltà avrà fine: perché la vita e la civiltà durerà finché splende il Sole. [...]

Giacomo Ciamician 1912 [Armaroli & Balzani, 2004;2008]



Figura 15 Fotografia Giacomo Ciamician (fonte: magazine.unibo.it)

Queste sono le parole del chimico e professore presso l'Università di Chimica di Bologna, che oggi appunto porta il suo nome, ad una conferenza da titolo “*La fotochimica del futuro*”, presentata a New York nel 1912 all’ottavo congresso internazionale di chimica applicata. Le parole di Ciamician esposte circa un secolo fa sorprendono per la loro lungimiranza e se sostituissimo il discorso sul carbone, il principale combustibile fossile utilizzato in quell’epoca, con petrolio o gas naturale vedremmo che esse risultano attuali. Ovviamente il segreto della fotosintesi naturale è ormai stato compreso, ma l’attuale società, che oggi ha ancora più fame di energia di allora, non è ancora riuscita ad utilizzarlo a pieno per produrne energia “pulita”.

Il Sole, stella che si trova nel centro del Sistema Solare, è la nostra fonte illimitata di energia, democraticamente e gratuitamente diffusa su tutto il pianeta.

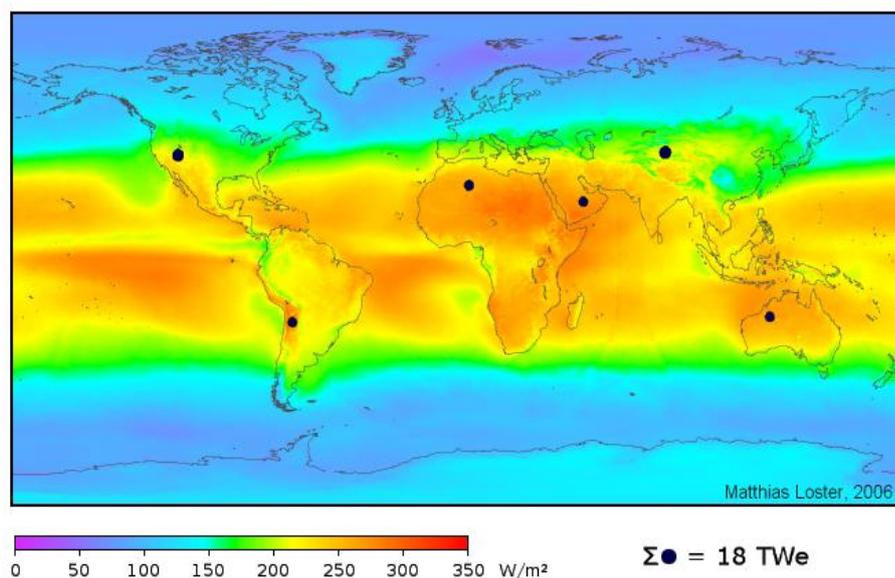


Figura 56 Distribuzione della radiazione solare (fonte: www.wikipedia.it)

L’*energia solare* è una radiazione elettromagnetica avente lunghezza d’onda (λ) compresa tra 0,2 e 3 μ m. In quest’intervallo si individuano frazioni di radiazioni aventi differente energia (*legge di Planck*), che suddividono l’intero spettro. Da $0,2 < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$, circa il 7% della radiazione raggiante, è la porzione dove cade l’ultravioletto (UV), da $0,4 < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$, il 42%, il visibile (VIS) e la percentuale maggiore (il restante 51%) avente $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$ cade nell’infrarosso (IR) (Gentilini, 1992; Armaroli & Balzani, 2011).

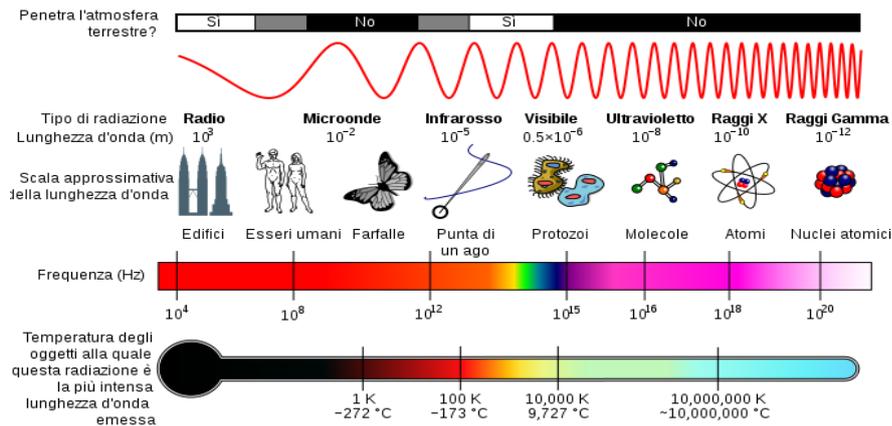


Figura 17 Spettro elettromagnetico (fonte: www.wikipedia.it)

La potenza emessa da ogni metro quadrato di superficie solare è di 64MW, ma solo una minima parte di essa, approssimativamente 1368 W/m^2 , raggiunge i confini esterni dell'atmosfera terrestre (Gentilini, 1992; Armaroli & Balzani, 2011). Questo valore viene comunemente definito *costante solare* (C_S) che si definisce come la potenza incidente per unità di superficie normale alla radiazione solare, al di fuori dell'atmosfera, alla distanza sole-terra. Essendo la distanza sole-terra (L_{ST}) di $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$, la potenza solare (P_S) vale: $4\pi L_{ST}^2 C_S = 3,8 \cdot 10^{23} \text{ kW}$, mentre la potenza intercetta dalla Terra (P_T), considerando che il raggio terrestre $R_T = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$, è pari a:

$P_T = C_S \pi R_T^2 = 1,73 \cdot 10^{14} \text{ kW}$ (174PW o petawatt). Di questa potenza solo il 51% circa raggiunge la superficie terrestre, poiché la radiazione incidente in parte verrà assorbita direttamente dall'atmosfera e dalle nuvole (circa il 19%) e il restante quantitativo, una percentuale attorno al 30%, subirà il fenomeno dell'albedo, una riflessione diretta dall'atmosfera, dalle nuvole e dalla terra verso lo spazio (Figura 18).

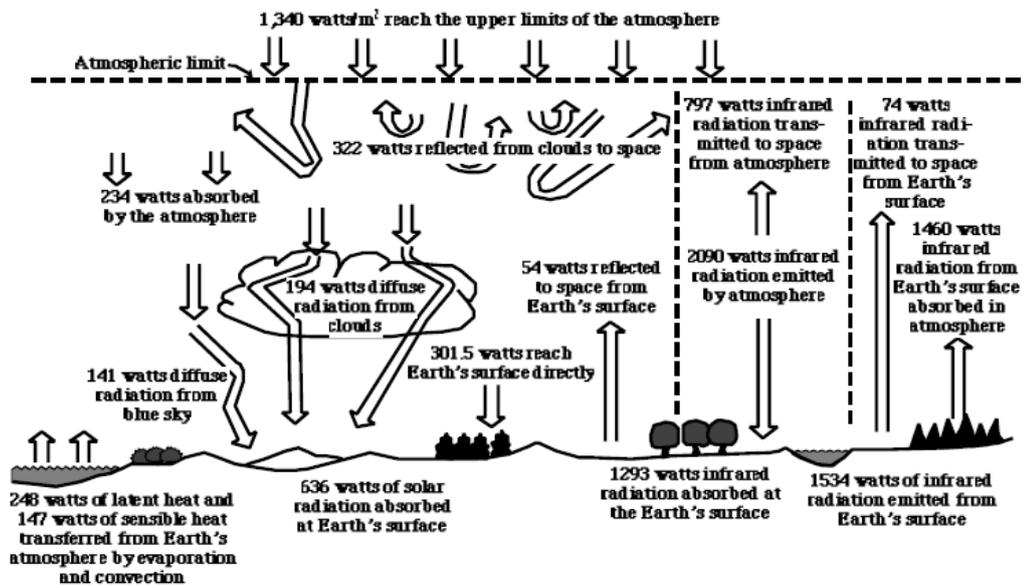


Figura 18 Bilancio delle radiazioni sulla Terra [55]

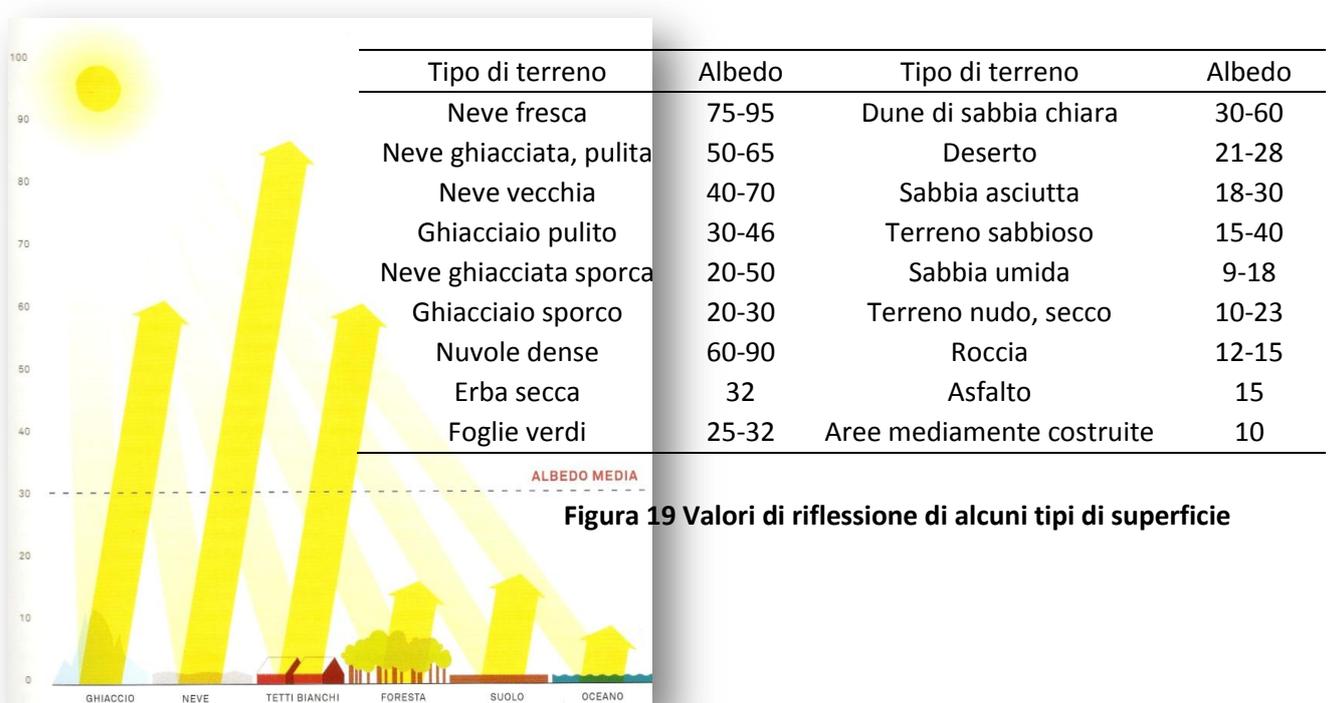


Figura 19 Valori di riflessione di alcuni tipi di superficie

Figura 20 Illustrazione fenomeno dell'albedo tipico di alcune superfici [44]

Il 51% della radiazione in entrata che raggiungerà la Terra viene assorbito, convertito in calore e re-irraggiato (in accordo con la *legge di Wien*) (Gentilini, 1992) come radiazione infrarossa (ad elevata lunghezza d'onda). Una parte di questa, circa il 15%, verrà trattenuta

dai *gas* presenti in atmosfera e trasformata in calore a lenta dissipazione. Le sostanze che ricoprono questo ruolo vengono chiamate *gas serra* e sono in grado di generare un effetto “*doppio vetro*” che permette di mantenere una temperatura media sul Pianeta di 15°C (*effetto serra naturale*).

4.3.2 La tecnologia del solare termico

Le due maggiori tecnologie che sfruttano l’energia solare in maniera diretta sono il pannello fotovoltaico, atto alla produzione di energia elettrica, ed il pannello solare termico.

Quest’ultima tecnica viene impiegata per produrre acqua calda sanitaria e/o per riscaldamento domestico. Si presume che un primo prototipo rudimentale dell’attuale pannello solare fu inventato nel 1767 da Horace-Bénédict de Saussure, il quale predispose tale tecnica per la cottura. Al giorno d’oggi la tecnologia si è notevolmente evoluta raggiungendo delle performance in grado di soddisfare le nostre richieste. Ciò è stato possibile incrementando il grado di assorbimento della radiazione solare ($a > 0,95$) e contemporaneamente di ridurre il fattore di emissività ($\varepsilon < 0,1$), che altrimenti ne abbasserebbe il rendimento.

Gli attuali strumenti sono costituiti da (Pauschinger et al., 2003):

- *Collettore*, solitamente costituito da un metallo ottimo conduttore termico, come il rame, che è in grado di assorbire l’energia irradiata incidente e di convertirla in calore.
- *Fluido termovettore*, che circola in contatto al collettore e al quale quest’ultimo cede calore. Comunemente si utilizza una miscela di acqua e glicole polipropilenico (atossico ed anticorrosivo). L’aggiunta di glicole serve a prevenire il congelamento invernale e ad incrementare il punto ebullioscopico.

	% DI PROPILLEN-GLICOLE				
	10%	20%	30%	40%	50%
TEMP CONGELAMENTO (°C)	-3	-7	-14	-23	-32
TEMP. EBOLLIZIONE (°C)	101	102	103	104	105

Tabella 7 Temperature di congelamento ed ebollizione di miscele acqua-propilenglicole [56]

- *Scambiatore di calore*, dove circola il fluido termovettore, utilizzato per riscaldare l’acqua contenuta all’interno di un *serbatoio di stoccaggio* ben coibentato.

Questi sono i componenti imprescindibili di ogni pannello, ma all’interno di questa ampia famiglia si individua un gran numero di tecnologie che hanno caratteristiche differenti. Alcuni pannelli solari vengono definiti *vetrati*, poiché oltre ad avere una coibentazione laterale e sul retro con poliuretano, sono dotati di un una copertura trasparente frontale che ne riduce le

dispersioni termiche dovute al reirraggiamento e, di conseguenza, ne migliora il rendimento (Pauschinger et al., 2003).

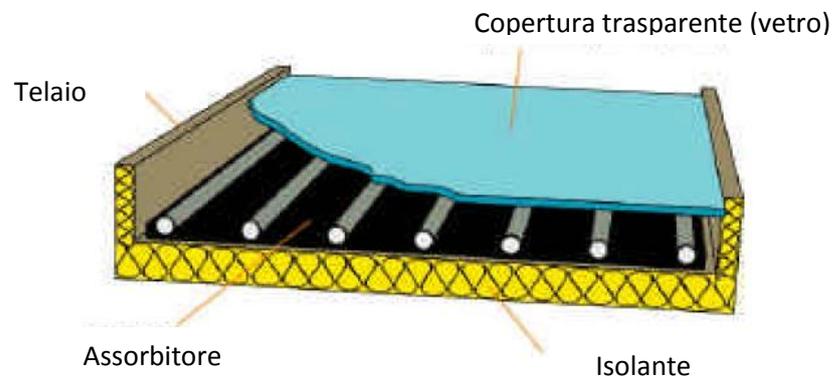


Figura 21 Struttura di un collettore tubolare vetrato [60]

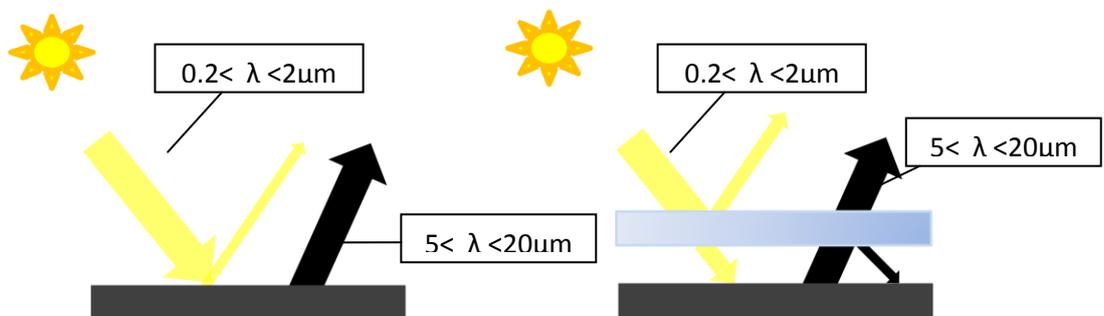


Figura 22 Schema di funzionamento di un pannello solare termico vetrato rispetto ad uno scoperto

Si hanno anche i *collettori a tubi sottovuoto*, dove ogni striscia di assorbitore è inserita in un tubo di vetro in cui è stato creato il vuoto. Questo comporta un'ottima coibentazione, di fatti come mostrato nella Figura 23 il fattore di efficienza rimane circa costante al variare del fattore χ (espresso in $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$). Tale caratteristica ne rende possibile il lavoro anche nel campo del calore per processi industriali, grazie al raggiungimento di temperature elevate (Pauschinger et al., 2003).

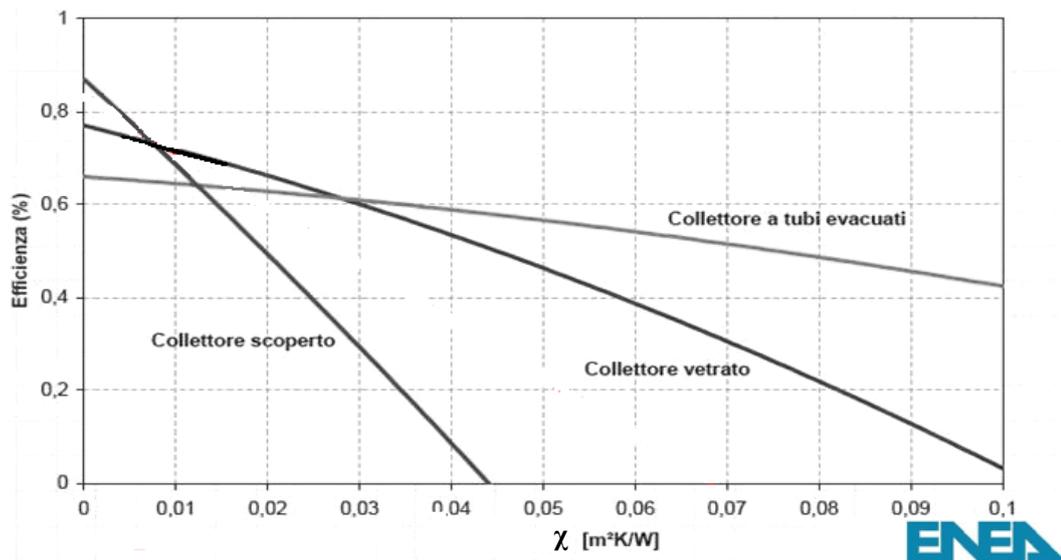


Figura 23 Andamento dell'efficienza di diverse tecnologie di solare termico (fonte:ENEA)

La superficie di tali impianti viene rivolta esattamente a sud, poiché è in tale direzione che garantiscono le massime prestazioni energetiche. Tuttavia alle volte particolari condizioni locali, come ad esempio gli ombreggiamenti o la posizione delle falde del tetto, possono consigliare una leggera variazione di orientamento rispetto al sud (la variazione massima consigliata è di 30° rispetto al sud). Siccome la somma della radiazione su una superficie dipende essenzialmente dal suo orientamento, l'inclinazione dei collettori, rispetto al piano orizzontale, sarà fondamentale per poter ottenere una radiazione massima incidente (Pauschinger et al., 2003). In particolar modo si ritiene che le prestazioni migliori si ottengano con un angolo di inclinazione di circa 30°; tuttavia esse saranno influenzate dal tipo di utilizzo e dalla stagione d'impiego (Merloni termosanitari, 2011).

- Per utilizzi invernali la migliore inclinazione corrisponde alla latitudine della località aumentata di circa 10 - 15° per incrementare la captazione anche con il sole basso verso l'orizzonte, $(L+10)^\circ$, $(L+15)^\circ$. Si possono accettare anche inclinazioni diverse attorno ai 10-20°, senza incorrere in grosse perdite nella resa dell'impianto.
- Se si intende utilizzare l'impianto continuativamente durante tutto l'arco dell'anno, è consigliata un'inclinazione pari alla latitudine $(L)^\circ$.
- Per impieghi esclusivamente estivi, come campeggi e piscine, l'inclinazione migliore è pari alla latitudine diminuita di 10-15° come: $(L-10)^\circ$, $(L-15)^\circ$.

Spesso per installazioni su tetti inclinati i collettori solari dovranno essere posizionati, per motivi estetici e precauzionali, parallelamente alla falda del tetto, anche se questa non possiede un'inclinazione ottimale (in questo caso per aumentarne la resa si amplia la

superficie captante) (Merloni termosanitari, 2011). Il funzionamento di tali pannelli può essere caratterizzato da una movimentazione del fluido termovettore in circolazione forzata oppure naturale. Il primo è formato da un collettore solare a sé stante, connesso attraverso un circuito con un serbatoio localizzato nell'edificio e la movimentazione del fluido è garantita da una pompa ($P = 40W$), che viene attivata da un regolatore differenziale, in grado di individuare quando la temperatura all'interno del collettore è superiore alla temperatura di riferimento impostata nel serbatoio di accumulo. Questa prima tecnologia, sicuramente più costosa e complessa, ha come vantaggio la posizione verticale, che consente un'efficienza maggiore, dovuta alla migliore stratificazione dell'acqua, e la collocazione dei serbatoi all'interno dell'edificio, lontano da intemperie. In estate l'impianto solare copre tutto il fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'acqua sanitaria, mentre in inverno e nei giorni con scarsa insolazione serve per il preriscaldamento dell'acqua. La parte del serbatoio che contiene l'acqua calda a pronta disposizione, cioè quella da tenere sempre in temperatura, può essere riscaldata da uno scambiatore di calore legato a una caldaia. Il riscaldamento ausiliario viene comandato da un termostato quando nel serbatoio la temperatura dell'acqua nella parte a pronta disposizione scende al di sotto della temperatura nominale desiderata.

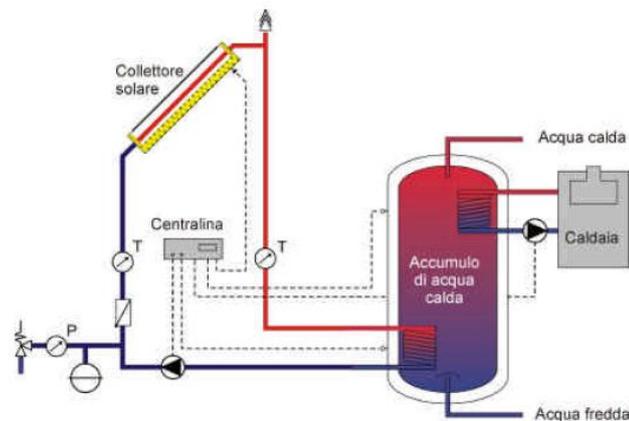


Figura 24 Schema di funzionamento di un impianto a circolazione forzata [60]

Negli impianti a circolazione naturale la movimentazione tra collettore e serbatoio di accumulo avviene grazie al principio di gravità, senza energia addizionale. Il fluido termovettore si riscalda nel collettore; ciò provoca una differenza di densità rispetto al fluido freddo, presente all'interno del serbatoio, tale da instaurare una circolazione naturale. Gli impianti a circolazione naturale vengono offerti come un'unità premontata fissata su una struttura di supporto oppure vengono integrati nel tetto. Il riscaldamento ausiliario può essere ottenuto con una resistenza elettrica, inserita nel serbatoio, oppure con una caldaia istantanea a valle del serbatoio (Pauschinger et al., 2003).

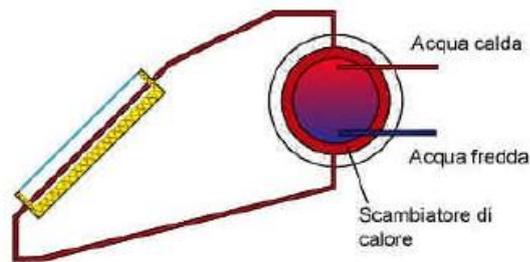


Figura 25 Collettore a circolazione naturale [60]

La tecnologia del solare termico, se ben sfruttata, può sottrarre spazio all'utilizzo di combustibili fossili smentendo le false credenze italiane secondo le quali la potenza solare che incide il nostro Paese non sia sufficiente a soddisfare il fabbisogno energetico. Molte fonti, come la carta del soleggiamento riportata di seguito, mostrano chiaramente che le potenzialità di uno stato del sud Europa, come il nostro, vanno dai 3000 ai 6000 Wh/m², paragonabili a

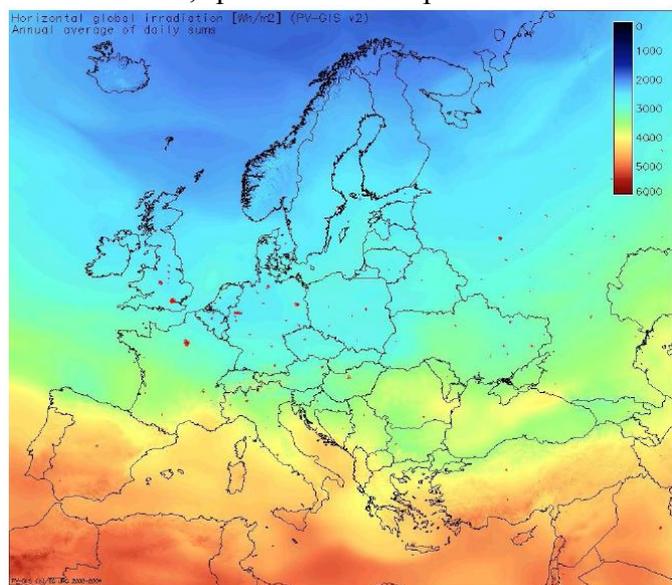


Figura 26 Carta del soleggiamento in Europa [75]

quelle di Spagna e Portogallo. Purtroppo nell'ultimo decennio l'Italia ha avuto una crescita modesta di tale tecnologia, che si è attestata attorno al 15% l'anno, minore della media mondiale (che è del 20%). Se nel 2005 la potenza complessiva installata era di 406,7MW_{th}, secondo un *Rapporto preliminare sullo stato attuale del solare termico nazionale* del 2007, effettuato dal CNES (Commissione Nazionale per l'Energia Solare), al 2020 potrebbe arrivare a 39.551 MW_{th}. Quindi ciò comporterebbe una notevole riduzione dei consumi nazionali di energia, che, grazie allo sfruttamento del solare termico, potrebbero essere ridotti del 30% (percentuale di energia utilizzata per "basse temperature" cioè a scopo residenziale) entro il 2030 (Armaroli & Balzani, 2004).

4.4 Pompa di calore

4.4.1 Descrizione generale della tecnologia

In molti casi si ha la necessità di realizzare dei flussi di energia termica nel verso crescente della temperatura, in contraddizione con quanto affermato dal secondo principio della Termodinamica, secondo il quale un corpo caldo cede calore ad uno più freddo in maniera irreversibile. Questo accade quando si vuole condizionare un ambiente raffreddandolo al di sotto della temperatura esterna, in estate, e riscaldandolo al di sopra in inverno (Dentice et al., 1999). La macchina che realizza queste operazioni è definita *pompa di calore reversibile o bivalente* (PDC), cioè in grado di svolgere sia la funzione di un frigorifero, sottraendo il calore all'ambiente da raffreddare, sia quella di una comune pompa di calore, in grado di riscaldare gli ambienti. Ovviamente il passaggio di calore da un ambiente freddo ad uno più caldo non può avvenire spontaneamente, perciò si dovrà compiere un lavoro per garantirne la movimentazione, quindi spendere energia che può essere fornita per via meccanica o per via termica. Le pompe di calore bivalenti stanno prendendo sempre più piede tanto nella realtà industriale, ad esempio negli uffici, quanto a livello residenziale. Molti cittadini si stanno rivolgendo a questa forma alternativa di riscaldare gli ambienti abitativi, che, se gestita correttamente, permette loro di avere un risparmio sulla bolletta, oltre alla possibilità di regolare la temperatura, con più efficienza di altri metodi, grazie all'installazione di termostati.

4.4.2 Principio di funzionamento ed efficienza

Le pompe di calore vengono definite macchine a compressione di vapore, poiché sfruttano il lavoro fornito al compressore per favorire il passaggio di energia termica da una zona a temperatura inferiore, T_L , ad una zona a temperatura maggiore, T_H . Nelle pompe di calore elettriche (EHP) questo apporto di energia viene fornito da un motore elettrico che aziona un compressore, fornendogli la potenza meccanica di compressione, \dot{L}_{CP} . Di seguito vengono rappresentati i componenti principali che costituiscono una macchina inversa operante come frigorifero o pompa di calore e l'andamento del ciclo termodinamico di Rankine inverso, in un diagramma pressione vs entalpia, per capirne meglio le singole fasi.

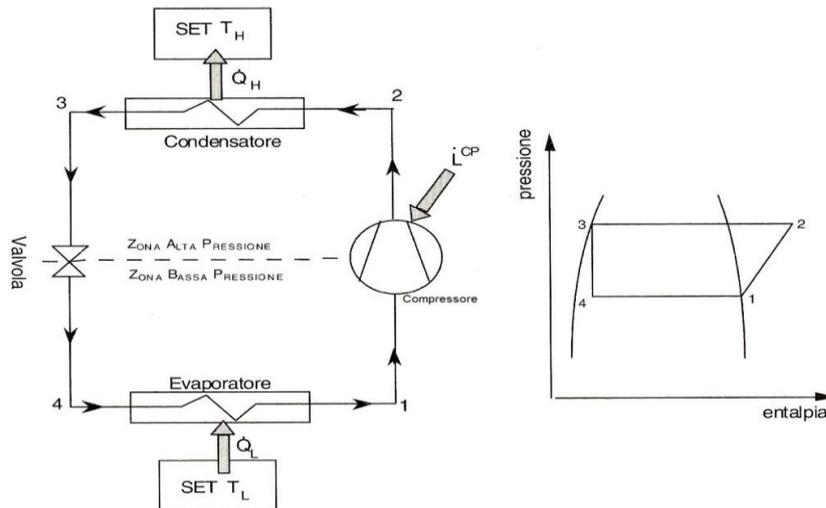


Figura 27 Schema di funzionamento di una pompa di calore bivalente [25]

Il fluido termovettore, comunemente si impiega un gas freon come R22, R124, R407 C, R134 A, viene aspirato in condizioni di vapore saturo secco, 1, viene portato ad una pressione superiore mediante l'utilizzo di un *Compressore* (trasformata 1-2). In queste condizioni, 2, il fluido è alla temperatura massima, perciò viene desurriscaldato facendolo passare all'interno di un *Condensatore* (trasformata 2-3 a pressione costante). Con la fase di condensazione la macchina cede all'ambiente ad elevata temperatura, SET T_H , la potenza di riscaldamento \dot{Q}_H . Successivamente si dovrà ridurre la pressione del liquido refrigerante; ciò avviene in una *Valvola* di laminazione (trasformata isoentalpica 3-4) all'uscita della quale il fluido è un vapore saturo. A questo punto nell'*Evaporatore* avviene l'ultima fase, dove grazie alla sottrazione di potenza termica \dot{Q}_L dall'ambiente a più bassa temperatura, SET T_L , avviene la fase di evaporazione (trasformata 4-1 a pressione costante) ottenendo nuovamente un vapore saturo secco (Dentice et al., 1999).

L'efficienza massima raggiunta dalla macchina viene definita teoricamente dal "ciclo di Carnot" come esclusivamente dipendente dalla differenza in temperatura, poiché ad essa è relazionata la potenza richiesta in input al compressore. Pertanto, per individuare le prestazioni di tali apparecchiature reversibili viene introdotto un coefficiente di performance (COP), che può essere visto come il rapporto tra l'effetto utile e la spesa energetica in input al compressore. Siccome si presume che la macchina abbia funzionamento bivalente, invernale ed estivo, si individuano due coefficienti, rispettivamente riferiti alle due stagioni di utilizzo.

$$COP_{H,rev} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (3)$$

$$COP_{L,rev} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (4)$$

Il valore di efficienza supera sempre l'unità e nelle pompe di calore più moderne si riesce addirittura a raggiungere un COP pari a 4-5, il che si traduce in una produzione di 4-5 kWh_{TERMICI} ogni kWh_{elettrico} in input (Acerbi, 2009).

Gli step che caratterizzano il processo sono: estrazione di energia a bassa temperatura da un'altra fonte poi trasformata dal compressore in energia a più alta temperatura (la potenza utile per effettuare la compressione dipende dalla differenza in temperatura che desideriamo).

Uno schema di funzionamento è riportato in Figura 28.

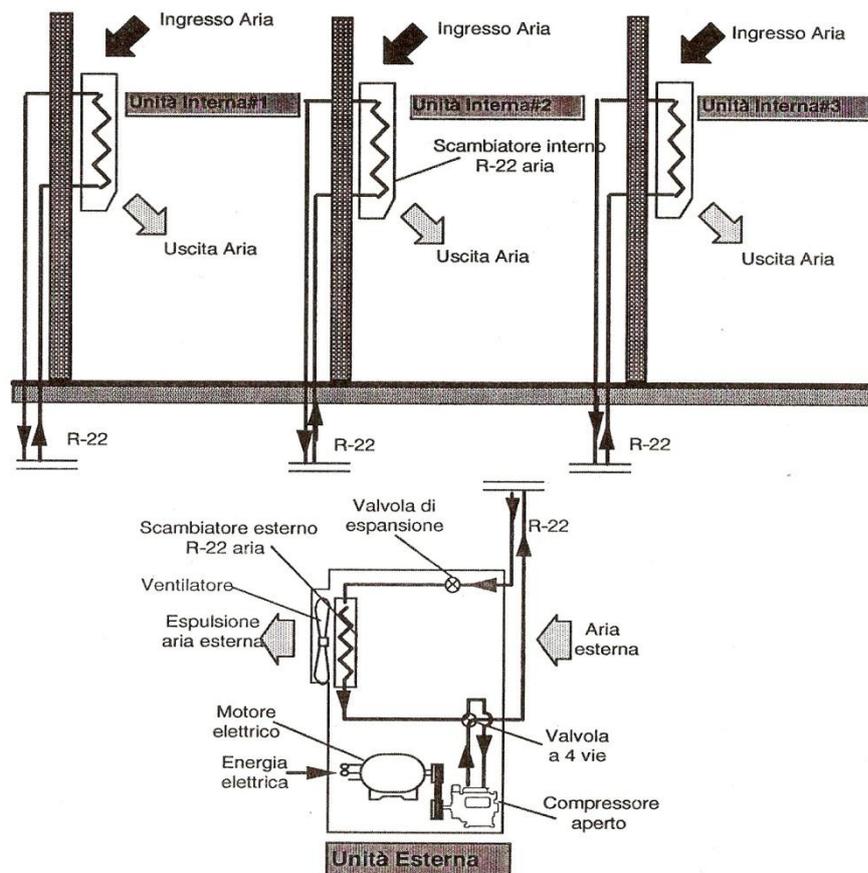


Figura 28 Principio di funzionamento pompa di calore elettrica [25]

Solitamente queste macchine sono costituite da due unità (Acerbi, 2009; Dentice et al., 1999):

- una esterna o *motocondensatore*, costituita da motore, compressore e scambiatore di calore esterno (che ha funzione di evaporatore in inverno e condensatore in estate);
- una interna o *sezione evaporante*, posizionata nell'ambiente da condizionare e separata dalla prima (**monosplit o multisplit**), comprende uno scambiatore di calore interno, con le stesse funzioni di quello esterno, uno o più ventilatori centrifughi e dei filtri per l'aria.

In generale la classificazione delle pompe di calore va fatta in base alla natura della sorgente fredda e di quella calda, che possono essere aria ed acqua. Di seguito vengono elencate le varie tipologie più comuni:

- *acqua-acqua*, verrà scaldata acqua trasferendo calore da altra acqua;
- *acqua-aria*, verrà scaldata acqua trasferendo calore da aria;
- *aria-aria*, verrà scaldata aria trasferendo calore da altra aria;
- *aria-acqua*, verrà scaldata aria trasferendo calore da acqua;

Come è facile intuire in questa classificazione, che è la più comune, il primo termine indica la sorgente fredda, mentre il secondo quella calda. Inoltre le varie tecnologie si differenziano in base alla fonte di energia sfruttata per promuovere il lavoro di compressione:

- *Pompa di calore ad azionamento meccanico o EHP*, il vettore energetico è l'energia elettrica, derivante dalla centrale che rifornisce l'appartamento.
- *Pompa di calore ad azionamento termico o GHP*, sfrutta l'energia chimica liberata dalla combustione di un combustibili fossile (solitamente gas naturale, gasolio o G.P.L.).
- *Pompa di calore ad assorbimento o AHP*, coppie di fluidi, refrigerante-assorbente, evolvono sfruttando la capacità di assorbimento di un opportuno solvente, assorbente, sul soluto, refrigerante.

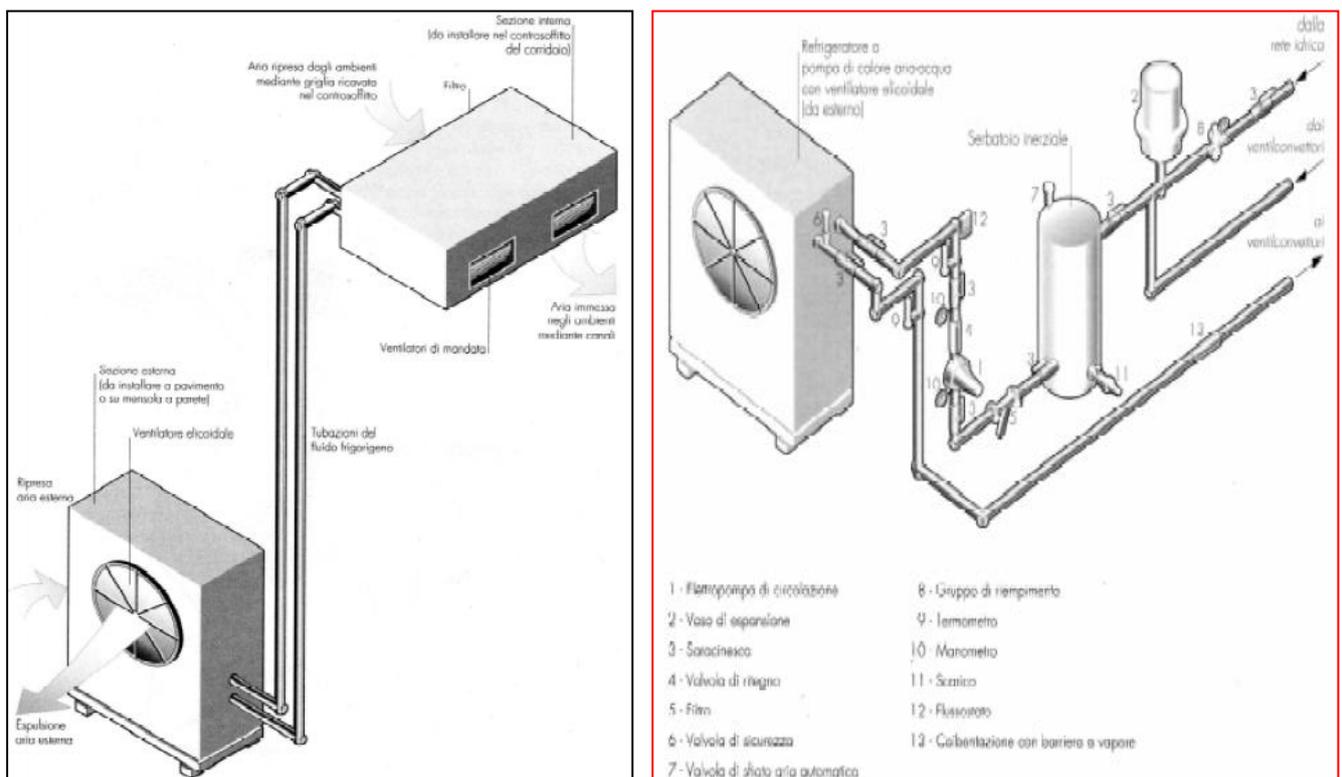


Figura 29 Componenti e schema di funzionamento di una pompa aria-aria ed aria-acqua [1]

5. LA METODOLOGIA LCA

5.1 Che cos'è la metodologia LCA (Life Cycle Assessment)?

Il concetto di Sviluppo Sostenibile ha iniziato a prender piede nel contesto culturale solo alla fine degli anni '80 del secolo scorso e da allora gli sforzi maggiori si sono concentrati nella capacità di riuscire a raggiungere simultaneamente gli obiettivi sociali, economici ed ambientali che ne sono alla base. Per ottenere questi risultati ci si è rivolti sempre più a strumenti in grado di poter supportare le scelte in ambito ambientale e ottenere dei risultati chiari e rapidi. Tra questi, la metodologia d'analisi *LCA* che contribuisce ad identificare nell'insieme quelle che sono le attività e le procedure più sostenibili.

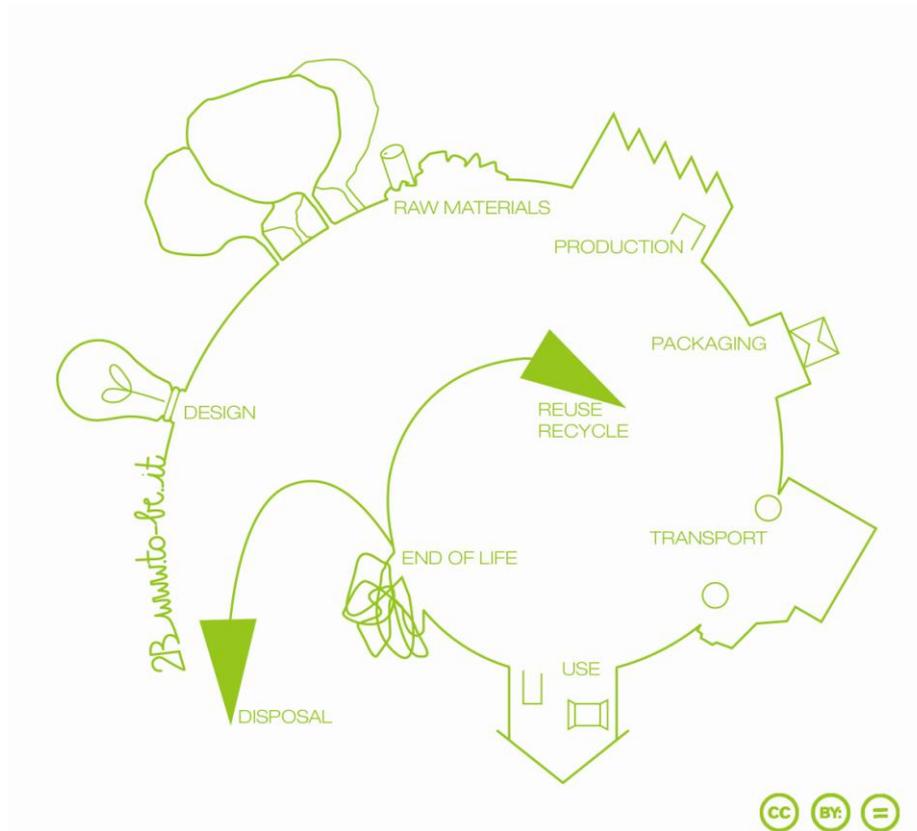


Figura 30 La metodologia LCA (fonte: http://www.to-be.it/notizie_estese.asp?idtesto=510#510)

La sigla *LCA* è l'acronimo inglese di *Life Cycle Assessment*, una metodologia oggettiva di analisi volta alla valutazione delle implicazioni ambientali di un prodotto, un processo o un'attività, durante tutte le fasi che ne caratterizzano l'intero ciclo di vita. Quando ci si riferisce a tale strumento si è soliti utilizzare l'espressione *from cradle to grave* (dalla culla alla tomba), per sottolineare la capacità della tecnica di tenere in considerazione gli aspetti

ambientali che caratterizzano tutte le fasi: dall'estrazione delle materie prime alla lavorazione dei materiali, dal trasporto all'assemblaggio del prodotto, dall'uso allo scenario di fine vita.

Lo strumento *LCA* è una tecnica relativamente recente poiché iniziò a diffondersi negli anni '60 del secolo scorso, quando comparvero i primi studi riguardanti le richieste di energia per la produzione di intermedi chimici, oppure modelli globali previsionali su quali sarebbero stati gli effetti di un aumento della popolazione mondiale sulla richiesta di materie prime e di energia [5], ma è solo agli inizi degli anni '90 che tale metodologia si consolidò. La nascita della tecnica in questione si deve principalmente agli sforzi congiunti di due organizzazioni internazionali, quali la ISO (*International Standard Organisation*) e la SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), che poggiarono le fondamenta per la messa a punto di uno strumento che trova spazio in molti campi. La SETAC, nel 1993, pubblicò un quadro di riferimento internazionale con l'obiettivo di ottenere una metodologia univoca e standardizzata, onde evitare possibili disagi associati alla non concordanza di risultati derivanti da studi effettuati su stessi prodotti [5]. Nasce una definizione universalmente riconosciuta della metodologia *LCA*.

“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, energia ed 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 alla collocazione finale del prodotto dopo l'uso.”

In concomitanza con il lavoro svolto dalla SETAC, l'organizzazione ISO effettuò una standardizzazione di questi metodi attraverso la definizione ed emanazione di norme che offrono riferimenti per la corretta applicazione dell'analisi del ciclo di vita. Inizialmente furono emanate ben quattro norme ISO specifiche per l'LCA, UNI EN ISO 14040, 14041, 14042, 14043, che dopo la revisione tecnica complessiva sono state accorpate in due:

- UNI EN ISO 14040 *Principles and Frame Work (Principi e Quadro di Riferimento)*
- UNI EN ISO 14044 *Requirements and Guidelines (Requisiti e Linee Guida)*

Dagli albori tale strumento ha subito una notevole evoluzione soprattutto nell'ambito applicativo. Di fatti, mentre agli inizi veniva impiegato principalmente a scopo commerciale per sostenere rivendicazioni ambientali usate come marketing, attualmente esso è il fulcro di

quella che viene oggi definita *politica ambientale*. Emerge la sua applicazione per scopi interni all'azienda come il miglioramento della produzione [6]. Sono note strategie aziendali che in Europa, ma anche in America ed Asia, promuovono il concetto di *Life Cycle Thinking (LCT)*, cioè pensare ad un prodotto in termini di intero ciclo di vita, come fundamenta su cui poggiare la loro struttura produttiva. L'*LCA* è lo strumento adatto per garantire che i principi su cui si basa un *LCT* possano essere raggiunti, poiché permette di individuare le criticità ambientali in ogni fase di un processo produttivo e successivamente di intervenire per migliorarle.

5.2 Struttura di una analisi LCA

La metodologia *LCA* fa parte, assieme ad EMAS/ISO, VIA e VAS, EPD, GPP ecc, dei molteplici strumenti che vengono utilizzati per garantire che gli obiettivi di una *IPP, Politica Integrata di Prodotto*, possano essere rispettati. In particolare la *IPP* è parte integrante della strategia comunitaria per lo sviluppo sostenibile, poiché, secondo la definizione UE, è esplicitamente orientata a modificare e migliorare le prestazioni ambientali dei sistemi prodotto. La sua funzione è mirata ai momenti in cui vengono prese le decisioni, le quali influenzano notevolmente l'impatto del ciclo di vita dei prodotti e offrono spazio per un miglioramento continuo.

La grande differenza della metodologia *LCA*, rispetto agli altri strumenti, risiede nella modalità di prendere in considerazione l'intero ciclo di vita, individuando per ogni fase i consumi di materia ed energia e la produzione di rifiuti e/o emissioni.

L'elaborazione di una *LCA*, secondo la procedura indicata da SETAC ed ISO, si articola essenzialmente in quattro fasi, che verranno descritte in dettaglio nel paragrafo di seguito.

1. Definizione obiettivi e scopo dello studio /*Goal and Scope Definition*
2. Analisi di inventario /*Life Cycle Inventory (LCI)*
3. Valutazione degli impatti /*Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*
4. Interpretazione dei risultati /*Life Cycle Interpretation*

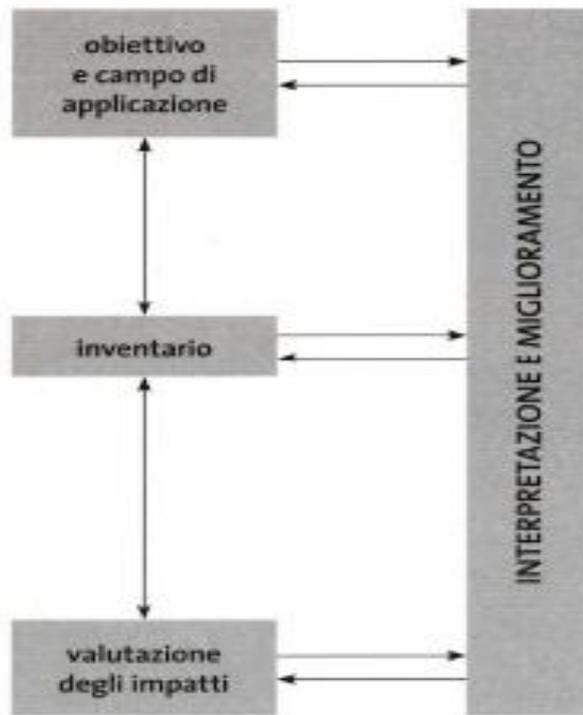


Figura 31 Struttura concettuale di una valutazione del ciclo di vita (LCA) [10]

5.2.1 Definizione degli obiettivi e degli scopi (*Goal and scope definition*)

La *Definizione degli obiettivi e degli scopi*, oltre a chiarire la ragione principale per la quale si esegue l'LCA, è di cruciale importanza per la buona riuscita dell'indagine stessa. Per questo motivo l'importanza di definire chiaramente gli obiettivi e le finalità dello studio viene sottolineata dalla norma ISO 14040, come segue:

“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere coerenti con l'applicazione prevista. 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”. (ISO 14040)

Il motivo di così tanto rigore risiede nel processo di modellazione, il quale potrebbe avere un approccio troppo soggettivo nelle scelte e nelle assunzioni fatte, che produrrebbe distorsioni e/o semplificazioni della realtà; ciò si ripercuoterebbe inevitabilmente sull'attendibilità dei risultati finali. Pertanto questa prima fase è essenziale affinché guidi lo svolgimento dell'analisi verso risultati attendibili e coerenti.

In questa fase gli aspetti presi in considerazione sono molteplici:

- il motivo per cui è stato intrapreso lo studio e il problema che si vuole affrontare;
- definire il processo/prodotto nel dettaglio;
- definire i confini del sistema;
- esporre le assunzioni fatte e i limiti che ne conseguono;
- descrivere la qualità dei dati;
- descrivere, se presenti, i criteri di allocazione;
- definire la celta dei parametri ambientali;
- il livello di dettaglio che si vuole raggiungere;
- definire il pubblico destinatario.

Come tutti i lavori non si può prescindere dalla definizione di quelli che sono gli **obiettivi**, ma in un'analisi LCA ci sono dei requisiti che devono essere rispettati. Tra questi è obbligatorio definire chiaramente le ragioni che conducono allo studio; inoltre, si deve individuare l'applicazione ed i destinatari, poiché, a seconda che essa sia rivolta ad una consultazione pubblica oppure all'interno dell'ente che l'ha proposta, i requisiti di “pesatura dati” sono differenti.

Inoltre in questa fase vengono definiti anche gli **scopi**, ovvero quelle che sono le scelte su metodologie, limiti ed assunzioni riguardo quel determinato processo. Ovviamente queste

decisioni non sono definitive, ma possono essere modificate man mano che si acquisiscono informazioni ulteriori da letteratura o da dati di prima mano. Questo comporta una continua analisi critica, che spesso porta alla convalida o alla correzione delle tesi adottate.

5.2.1.1 Definizione dei confini di sistema

Questa fase è cruciale, poiché in essa vengono posti i limiti all'estensione dello studio. Definire i **confini di sistema**, significa riuscire ad individuare le unità di processo che devono essere incluse nello studio LCA ed escludere le superflue, cioè tutte quelle che non fanno più parte del sistema. Di fatti nel linguaggio comune di un'analisi LCA viene definito “sistema” *un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più precise operazioni industriali aventi una determinata funzione*, mentre tutto quello che è al di fuori di esso viene definito semplicemente ambiente, con il quale il sistema di riferimento è connesso poiché scambierà flussi in input ed output (di materia, energia e rifiuti).

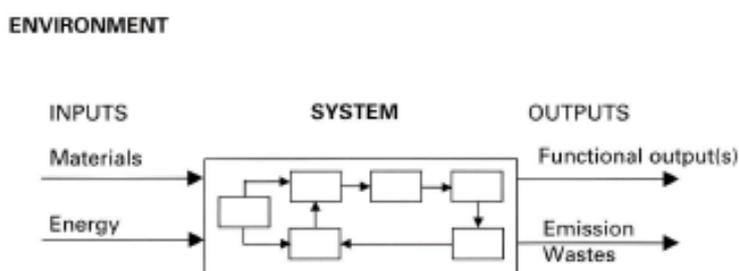


Figura 32 Definizione schematizzata dei confini di sistema [19]

Queste interconnessioni possono essere assai complesse, perciò risulta impossibile considerare tutti i flussi presenti, senza aver individuato a monte le fasi che compongono il sistema, in termini di “operazioni unitarie”. Ognuna di esse presenta flussi in entrata e in uscita che le connettono alle unità che le precedono e le seguono, secondo l'effettivo schema produttivo e solo in condizioni stazionarie; il comportamento di un'operazione unitaria è indipendente dalle altre.

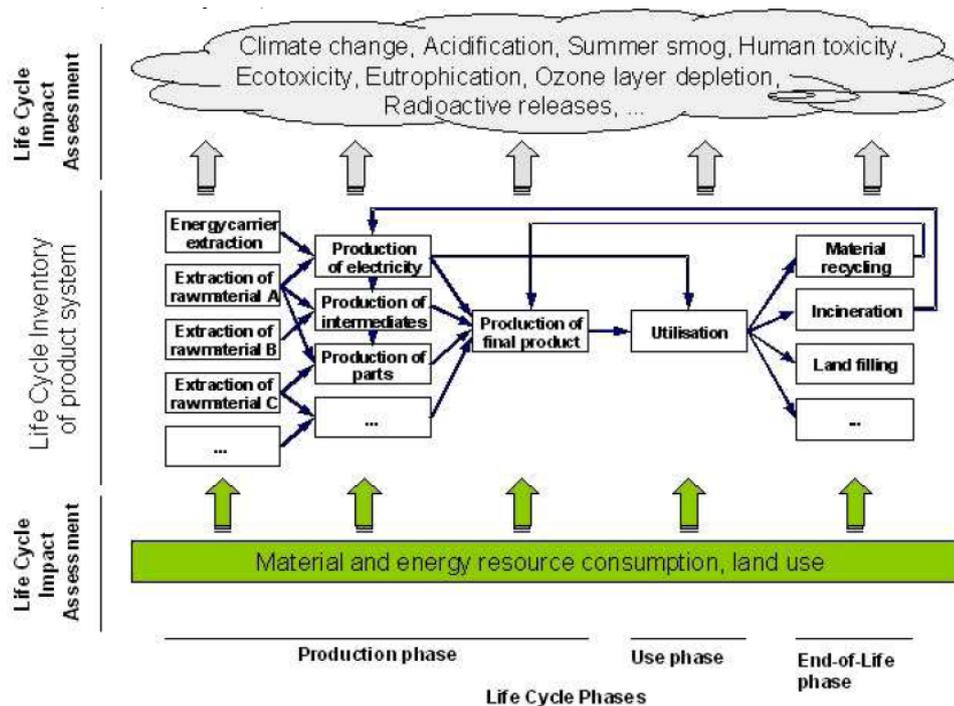


Figura 33 Rappresentazione schematica della connessione tra fasi del ciclo di vita e flussi associati (fonte: lca.jrc.eu)

Come è facile intuire un'analisi LCA ha delle potenzialità immense, che possono essere sfruttate a pieno estendendo i confini del sistema a tutto il ciclo di vita del prodotto (il metodo *cradle to grave* appunto). Spesso però capita che questo approccio non sia possibile a causa di mancanza di informazioni e/o dati o che lo scopo dello studio preveda un metodo in cui non sia necessario considerare l'intero ciclo di vita, ma soffermarsi ad una o più fasi di esso (ad esempio in alcuni casi può essere interessante valutare e confrontare tra loro solo possibili scenari di fine vita – *End-of-Life*). Si può concludere pertanto che una LCA può essere interpretata come un gruppo di sottosistemi, chiamati *eco bilanci*. È dunque possibile indagare i comportamenti dei singoli sottoinsiemi presi in considerazione, l'importante è che ogni scelta venga presa in accordo con quanto dichiarato nello scopo dello studio in questione.

In conclusione, i criteri per definire i confini di sistema sono i seguenti:

- individuare i confini del ciclo di vita (ad esempio “from cradle to grave”o “End-of-Life”);
- definire i confini geografici, che stabiliscono i limiti del sistema produttivo; vengono presi in considerazione specialmente nelle LCA sito-specifiche;
- individuare i confini di carico ambientale: una LCA può comprendere tutti gli input ed output (es. materie prime rinnovabili e non, emissioni atmosferiche e liquide, rifiuti solidi, perdite di energia, radiazioni, rumore, etc.), o tenere conto solo di parte di essi (es. solo emissioni atmosferiche e liquide);

- definire i confini temporali (*temporal boundaries*), che specificano il periodo temporale di riferimento per lo studio.

In relazione a quanto detto sopra, è possibile determinare tre ordini di dettaglio per i confini di sistema.

- Primo livello: include solo la produzione dei materiali ed il loro trasporto.

- Secondo livello: include tutti i processi dell'ecobilancio in oggetto, ma non quelli relativi alle infrastrutture e ai macchinari (*capital goods*).

- Terzo livello: include anche i *capital goods*, solitamente modellati con dettaglio al primo livello

5.2.1.2 Definizione dell'unità funzionale e del flusso di riferimento

Nella fase iniziale degli studi di analisi del ciclo di vita è di fondamentale importanza definire un'unità di misura, chiamata "*unità funzionale*", alla quale relazionare tutti i dati relativi ai flussi in entrata ed uscita così da permettere il confronto dei risultati ottenuti. Questo evita di incappare nella criticità di porre a confronto due sistemi differenti utilizzando metodi di paragone non analoghi, ciò inevitabilmente porterebbe ad una distorsione dei risultati.

Secondo quanto riportato nella norma ISO 14040 è necessario che l'unità di riferimento sia definita e misurabile, perciò la scelta, indipendentemente dalle funzioni del sistema, ricadrà su un parametro con tali caratteristiche. A volte, a seconda degli scenari indagati, può essere adeguato riferire i dati di inventario non più ad una unità di riferimento, ma ad un flusso (*reference flow*).

5.2.1.3 Criteri per la scelta dei flussi in ingresso ed uscita

Oltre ai principi per una corretta scelta dei confini di sistema e dell'unità funzionale, la norma ISO 14044 espone dei criteri per la selezione dei flussi coinvolti nell'analisi. Tali misure riguardano diversi aspetti, tra cui:

- la *massa*: sono conteggiati tutti i flussi che contribuiscono cumulativamente sopra ad una determinata percentuale di tutti gli input;
- l'*energia*: analogo al precedente, ma in termini energetici;
- la *rilevanza ambientale*: include tutte le entità che contribuiscono più di una determinata percentuale alla quantità stimata di ciascuna categoria ambientale;
- la *rilevanza economica*: tale parametro può essere scelto a piacimento per individuare i flussi in ingresso ed in uscita, nonostante la normativa ISO non imponga analisi economiche in suddetti studi.

5.2.1.4 Criteri di allocazione

Spesso si hanno molteplici processi che conducono alla produzione di differenti prodotti finali o a prodotti con funzioni diverse (co-prodotti e/o sottoprodotti). Pertanto, negli studi di analisi LCA, si definisce *allocazione* il principio che permette di ripartire tra i vari output il carico ambientale associato a questi processi (ad esempio l'allevamento di bestiame).

I metodi per poter eseguire un'allocazione sono molteplici, tuttavia le norme ISO prevedono l'utilizzo di alcune strategie per procedere in maniera corretta. Di seguito vengono riportate in sintesi.

1. Laddove possibile evitare l'allocazione, scomponendo il processo in due o più equivalenti, ognuno dei quali con un solo output.
2. Ampliare i confini di sistema così da comprendere i processi necessari per produrre un output simile.
3. Se è impossibile evitare l'allocazione, distribuire i carichi ambientali sulla base di criteri fisici, come massa o energia, degli output (cioè il carico ambientale verrà suddiviso proporzionalmente in base al peso, al contenuto energetico e al volume del prodotto).
4. Se le soluzioni precedenti non sono attuabili, adoperare criteri di allocazione socioeconomici, come ad esempio il valore economico.

Quest'ultima, nonostante sia tutt'ora presente nelle norme ISO, è ancora poco impiegata; ciò deriva dalla difficoltà di comprendere parametri economici all'interno di uno studio di LCA.

5.2.2 Analisi di inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*)

L'analisi di inventario è indubbiamente la fase più delicata e dispendiosa in termini di tempo dell'intero studio LCA, poiché ha lo scopo di realizzare un modello simile alla realtà, che rappresenti, il più concretamente possibile, tutte le connessioni tra le singole operazioni appartenenti al sistema. Verranno individuati e quantificati i flussi in ingresso ed uscita da un sistema-prodotto, lungo tutta la sua vita, identificando e determinando i consumi di risorse (materie prime e prodotti riciclati, acqua), d'energia (termica ed elettrica) e le emissioni in aria, acqua e suolo.

Ovviamente in questa prima fase non interessa minimamente compiere valutazioni e dare giudizi sulle possibili ripercussioni degli input ed output sull'ambiente, ma lo scopo principale è quello di fornire dati attendibili ed oggettivi, che verranno solo in seguito elaborati e interpretati per trarne le giuste conclusioni.

Per garantire una corretta stesura di un inventario, la norma ISO 14040 predispone una serie di criteri da seguire per ottenere l'oggettività delle informazioni. Ad esempio, un metodo ottimale per verificare se i dati raccolti rispondano ai requisiti di qualità e oggettività è quello di procedere per via iterativa, come mostrato di seguito in figura.



Figura 34 Processo iterativo per la valutazione dell'affidabilità dei dati [10]

Ovviamente costruire un inventario in maniera graduale, verificando ogni volta l'attendibilità dei dati, fa sì che man mano che si proceda con la raccolta si comprende sempre meglio il sistema di riferimento. Ciò potrebbe portare a delle modifiche nei metodi di collezione dei dati, tenendo sempre conto degli obiettivi dello studio in questione.

La fase di inventario comunemente viene divisa in quattro moduli, che vengono esaminati in dettaglio di seguito.

5.2.2.1 Requisiti di qualità ed affidabilità dei dati

Questo paragrafo ha lo scopo di accennare aspetti di carattere generale riguardo alla qualità e all'affidabilità dei dati. Descrizioni più dettagliate in merito alle modalità di raccolta, di selezione e di qualità dei dati utilizzati nel presente lavoro di tesi vengono fornite in seguito nella sezione Parte Sperimentale.

Per garantire trasparenza nella realizzazione del lavoro è necessario fissare a monte la qualità delle informazioni di cui si dispone, assicurando la rappresentatività statistica del dato, la sua origine e riproducibilità. Ciò è essenziale a garantire l'attendibilità dello studio LCA, che si traduce in una buona qualità del risultato finale. Per garantire quanto detto è necessario che la selezione dei dati sia congrua a quelli che sono gli obiettivi dell'analisi, esplicitati chiaramente nella fase di *Goal and Scope definition*. Tuttavia, come accennato in precedenza lo stadio a monte di una LCA, dove vengono individuati gli scopi, non è un documento definitivo, ma viene costantemente revisionato criticamente, per verificare la praticabilità o meno delle scelte iniziali. Questo significa che ci si deve comunque riferire a criteri fondamentali per assicurare una buona qualità dei dati. Tra questi menzioniamo:

- ✓ la *correlazione temporale*: si riferisce ad un'età rappresentativa (es. un periodo di 5 anni) ed una frequenza temporale minima (es. annuale);
- ✓ la *correlazione spaziale*: ovvero un'area geografica (locale, nazionale, globale) dalla quale è possibile raccogliere i dati per unità di processo, utili al conseguimento dello studio;
- ✓ la *correlazione tecnologica*: si riferisce alla tecnologia adoperata nell'unità di processo (BAT, etc.).

Inoltre, per ottenere dei dati di qualità, non sono sufficienti i requisiti sopra elencati, ma è bene tenere in considerazione anche i seguenti concetti:

- *Precisione*: valuta la variabilità dei valori per ogni categoria di dati (es. varianza);
- *Completezza*: è intesa come il numero di siti da cui derivano i dati primari in relazione a quello dei potenziali esistenti (per ogni categoria di dati in ciascuna unità di processo);
- *Rappresentatività*: rappresenta il grado con cui l'insieme dei dati riflette la popolazione interessata (es. geografia, tempo, tecnologia);
- *Coerenza*: stima l'uniformità nell'applicazione della metodologia alle diverse parti dell'analisi;
- *Riproducibilità*: individua la trasparenza e la disponibilità delle informazioni.

È chiaro che non tutte le informazioni reperite possono avere lo stesso livello di accuratezza, ma spesso capita che alcuni dati siano meno dettagliati di altri.

Per questo motivo una strategia utilizzata per non incappare in tale errore è quella di definire a priori un diagramma di flusso (*flow-sheet*), nel quale riportare le operazioni da comprendere nel sistema, il grado di dettaglio e la fedeltà del diagramma rispetto al processo in esame. La fedeltà nella riproduzione di un *flow-sheet* è dovuta più che altro alla presenza di tutti gli aspetti significativi. Da ciò si deduce che spesso è necessario lasciar fuori alcune componenti del sistema; tale esclusione deve essere logica, motivata e sempre esplicitata.

Nell'ambito qualità dei dati è di primaria importanza fare una netta distinzione fra:

- *foreground data*
- *background data*

Il primo termine si riferisce a tutte le informazioni o dati che sono propri del sistema studiato e che quindi è fondamentale acquisire direttamente (ad esempio mediante monitoraggi diretti). Solitamente essi vengono definiti “dati primari”, poiché derivano chiaramente da uno studio dedicato. Mentre con il termine *background data* si intendono tutte quelle informazioni chiamate anche “dati secondari”. Spesso quest’ultimi rappresentano la gran parte dei dati utilizzati nella modellazione di uno scenario, ciò è dovuto alla maggior facilità di reperimento in database specifici, in letteratura o da fonti terze attendibili.

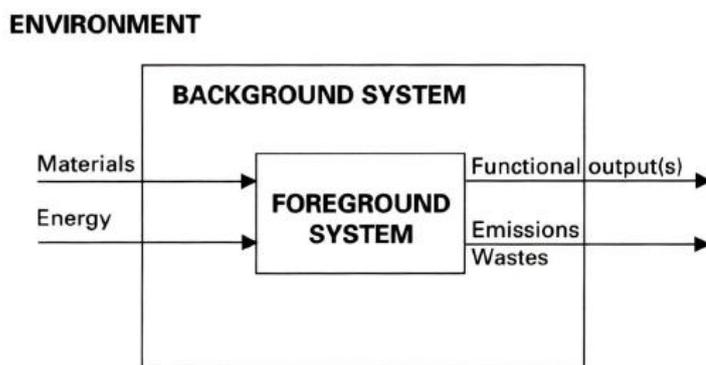


Figura 35 Distinzione schematizzata tra dati background e foreground di un sistema [19]

Ovviamente quando vengono utilizzati dati secondari ci si deve assicurare che essi siano congruenti, derivanti da fonti sicure, aggiornati ed in accordo con gli obiettivi precedentemente prefissati.

Quanto ai dati primari, quelli riguardanti gli input di energia e materia sono molto più accessibili rispetto ad esempio a quelli che si riferiscono agli output. Poiché mentre i primi vengono sempre registrati dalle aziende, i secondi, come ad esempio emissioni o

concentrazioni di specie chimiche, difficilmente saranno schedati. Spesso per sopperire a questa mancanza di dati in output è possibile fare una stima attraverso dei calcoli, che a volte fornisce delle informazioni più veritiere rispetto a quelle ottenute da misurazioni saltuarie. Ovviamente l'impiego di dati primari è preferibile all'utilizzo di banche dati, le quali semplificano notevolmente la ricerca di informazioni, ma spesso sono oggetto di discussione riguardo la loro attendibilità. Per questo motivo l'orientamento della SETAC ed ISO è verso la promozione di banche dati accreditate, facilmente condivise ed accessibili, in cui le fonti dei dati siano riconosciute internazionalmente e rispondano ai requisiti di tracciabilità.

5.2.3 Valutazione degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*)

Come già accennato, nella fase di inventario non vengono espressi giudizi in merito agli effetti che ogni carico ambientale, individuato nello stadio precedente, può avere sulle singole categorie d'impatto, poiché questa funzione viene svolta dallo step successivo chiamato appunto *valutazione degli impatti*. Di fatti tale fase consiste in un processo tecnico-quantitativo in grado di comprendere e valutare l'importanza e il significato degli impatti ambientali, derivanti dal consumo di risorse e dai rilasci nell'ambiente associati alle attività produttive in questione. Il livello di dettaglio, la scelta degli impatti da stimare e le metodologie da impiegare dipendono dall'obiettivo e dal campo d'applicazione dello studio. Bisogna comunque considerare l'oggettiva difficoltà nell'individuare ed interpretare le relazioni che vi sono tra le emissioni e gli effetti ambientali. Questa complicazione è dovuta alla difficoltà di associare un impatto a specifici effetti ambientali, perciò ci si limita ad esaminare la definizione di impatto dettata dall'ISO 14040:

“un impatto è una qualsiasi modificazione causata da un altro aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l'ambiente”.

Interpretando quanto scritto sopra è chiaro come un impatto prelude ad un effetto, senza però esigere di riuscirne a valutare rigorosamente l'entità.

Perciò, mentre si è in grado di ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati della fase di analisi di inventario, non è possibile fare altrettanto per i corrispondenti effetti ambientali, che pertanto possono solo essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni stabilite e riconosciute a livello internazionale.

Oltre alla determinazione degli impatti bisogna porre l'attenzione sull'estensione dei danni da essi causati, poiché in alcuni casi si hanno danni maggiori in luoghi circoscritti ed in prossimità della sorgente, mentre in altri si possono avere ripercussioni a livello planetario. Per questo motivo viene effettuata una classificazione degli effetti ambientali, basata sul raggio di azione, in: *globali, regionali e locali*. Per attribuire una forma di inquinamento alla corrispettiva scala di estensione è bene considerare tre fattori:

- la diffusione di sostanze nocive (*emissione*);
- l'emanazione e il possibile mutamento di sostanze una volta immesse nell'ambiente (*trasmissione*);
- la concentrazione o deposizione di sostanze inquinanti nel luogo d'azione (*immissione*).

Inoltre bisogna tenere in considerazione che includere nello studio alcuni effetti ed escluderne degli altri, oppure la probabilità che da un impatto possono scaturire più danni ambientali, condiziona il livello di dettaglio dei risultati.

5.2.3.1 Il metodo ReCiPe 2008

Le norme ISO 14040 e 14044 presuppongono una struttura generale ben definita di un LCIA.

Si possono distinguere rispettivamente:

- *Elementi Obbligatori:*
 - ✓ *Classificazione*
 - ✓ *Caratterizzazione*
- *Elementi Opzionali:*
 - ✓ *Normalizzazione*
 - ✓ *Pesatura*

Tali elementi hanno il compito di convertire i risultati di inventario in appropriati indicatori in grado di migliorarne l'interpretazione.

• Elementi obbligatori

Classificazione (*qualitativa*)

La fase di classificazione consiste, secondo normativa ISO, nell'organizzare i dati di inventario in modo da garantirne una quantificazione nella fase successiva di caratterizzazione. Per consentire una tale operazione si adotta l'approccio "*problem-oriented*", attraverso il quale i principali metodi di valutazione degli impatti possono essere distinti in:

- ✓ *Midpoint oriented*
- ✓ *Endpoint oriented*

a seconda che le emissioni di sostanze pericolose e il consumo di risorse naturali siano convertite mediante indicatori di categorie di impatto intermedio (midpoint), come acidificazione, cambiamento climatico, ecotossicità, o finale (endpoint), come danno per la salute umana, consumo di risorse e qualità dell'ecosistema.

Caratterizzazione (*quantitativa*)

Questa fase ha lo scopo di quantificare il contributo di ogni carico agli effetti ambientali considerati, attraverso l'utilizzo di opportuni fattori di caratterizzazione.

- Elementi opzionali

Normalizzazione

Tale procedimento è stato introdotto per determinare una sequenza di significatività tra i contributi alle categorie di impatto considerate. Non vi è un unico metodo di normalizzazione, ma ognuno ha lo scopo di confrontare i risultati delle categorie di impatto con un valore di riferimento. La scelta di quest'ultimo può ricadere su valori differenti a seconda dei casi, ma solitamente si predilige il carico medio annuo, in una nazione o in una regione, per il numero di abitanti. In questo modo si è in grado di stimare il livello di inquinamento pro-capite.

Attraverso il procedimento di normalizzazione è possibile ridurre la complessità dell'analisi trattando in maniera congrua le categorie di impatto trascurabili, rispetto al totale degli impatti; inoltre mette in risalto la magnitudo dei problemi ambientali in funzione dei processi appartenenti al sistema.

Pesatura

La fase conclusiva della LCIA è quella di pesatura, che permette di confrontare tra loro i vari impatti pesando i relativi significati. Questo si traduce in una procedura estremamente soggettiva, che pertanto è sconsigliata dalla normativa ISO come unico metodo di valutazione in studi di LCA di dominio pubblico.

In questo lavoro di Tesi le fasi di normalizzazione e pesatura sono state eseguite mediante l'impiego del metodo **ReCiPe 2008**.

Il metodo di analisi ReCiPe 2008 consiste in un metodo di LCIA che armonizza e implementa i due approcci *problem oriented* descritti in precedenza, considerando come punto di partenza due tra i metodi più diffusi per la valutazione degli impatti:

- ✓ *CML 2002*, proposto da Guinée et al. (2002, *Handbook on LCA*), quale metodo midpoint oriented;
- ✓ *Eco-indicator'99*, proposto da Goedkoop & Spriensma (1999), quale endpoint method.

Tale metodo comprende due set di categorie di impatto con relativi fattori di caratterizzazione.

Le categorie di impatto *midpoint* sono diciotto e vengono riportate di seguito in Tabella 8.

Impact category Name	abbr.	Indicator name	unit*
climate change	CC	infra-red radiative forcing	W×yr/m ²
ozone depletion	OD	stratospheric ozone concentration	ppt [†] ×yr
terrestrial acidification	TA	base saturation	yr×m ³
freshwater eutrophication	FE	phosphorus concentration	yr×kg/m ³
marine eutrophication	ME	nitrogen concentration	yr×kg/m ³
human toxicity	HT	hazard-weighted dose	–
photochemical oxidant formation	POF	Photochemical ozone concentration	kg
particulate matter formation	PMF	PM ₁₀ intake	kg
terrestrial ecotoxicity	TET	hazard-weighted concentration	m ² ×yr
freshwater ecotoxicity	FET	hazard-weighted concentration	m ² ×yr
marine ecotoxicity	MET	hazard-weighted concentration	m ² ×yr
ionising radiation	IR	absorbed dose	man×Sv
agricultural land occupation	ALO	occupation	m ² ×yr
urban land occupation	ULO	occupation	m ² ×yr
natural land transformation	NLT	transformation	m ²
water depletion	WD	amount of water	m ³
mineral resource depletion	MRD	grade decrease	kg ⁻¹
fossil resource depletion	FD	upper heating value	MJ

* The unit of the indicator here is the unit of the physical or chemical phenomenon modelled. In ReCiPe 2008, these results are expressed relative to a reference intervention in a concrete LCA study.

† The unit ppt refers to units of equivalent chlorine.

Tabella 8 Categorie midpoint metodo Recipe2008 [42]

Mentre le categorie di impatto *endpoint*, nelle quali sono convertite ed aggregate la maggior parte delle *midpoint categories*, sono invece tre e verranno descritte di seguito.

✓ HUMAN HEALTH (HH)

ReCiPe 2008 adotta come unità di misura per la valutazione del danno sulla salute umana il DALY – Disability Adjusted Life Years – proposto da Hofstetter (1998). Il DALY di una malattia si basa sulle statistiche di salute umana per gli anni di vita persi o vissuti in condizioni precarie. ReCiPe 2008 adotta l'assunzione convenzionale che non ci sia distinzione di età, né alcuna variazione per le generazioni future; ciò comporta che il DALY sia stimato come somma degli anni di vita persi (YLL) e gli anni di vita vissuti con disabilità (YLD):

$$\text{DALY} = \text{YLL} + \text{YLD}$$

YLD, a sua volta, è dato dal prodotto tra un fattore di severità w (range: 0;1) e la durata D della malattia:

$$\text{YLD} = w \cdot D$$

Limitazioni:

- DALY considera stime mediate su tutta la popolazione mondiale: scarsa rappresentatività regionale o sito specifica.
- DALY è calcolato trascurando le differenze di età e il decremento di danno per le generazioni future.
- L'impiego di YLD include una valutazione soggettiva del peso di ciascuna malattia.

✓ ECOSYSTEM DIVERSITY (ED)

L'approccio adottato è quello di considerare la qualità dell'ecosistema in termini di flussi di energia, materia e informazioni, che si riferiscono agli aspetti considerati importanti per tutto il genere umano, come biodiversità, valori estetici, servizi e funzioni ecologiche, risorse ecologiche e informazione genetica. Quando tali flussi sono adottati per caratterizzare un ecosistema, il risultato è che per avere un'alta qualità dello stesso tutti i flussi avvengano senza una significativa alterazione causata da attività antropiche. Di conseguenza, il livello di alterazione antropica è il più importante parametro per valutare la qualità dell'ecosistema.

In ReCiPe 2008 è stata adottata l'assunzione che le diversità tra le specie rappresentano adeguatamente la qualità di un ecosistema. In base alla distinzione tra completa estinzione di una specie e scomparsa reversibile o irreversibile di un'altra in una regione e in un dato periodo, la prima tipologia non è considerata nel modello di valutazione degli impatti dal momento che la scomparsa di una specie non può essere vincolata al ciclo di vita di un solo prodotto, ma ogni prodotto può invece determinare effetti ed impatti che contribuiscono all'estinzione di essa.

La scelta di considerare tutte le specie equamente si traduce, nel modello, nel pesare il danno sulla base del numero totale di specie terrestri e marine come riferimento. Ciò include che la scomparsa in un compartimento ricco di specie è più grave rispetto ad un'area meno arricchita.

Il fattore di caratterizzazione (CF_{ED}) per la valutazione dell'endpoint (ED) è dato dalla somma di ciascun PDF (*Potential Disappear Fraction of species*) moltiplicato per ciascuna densità di specie (SD):

$$CF_{ED} = PDF_{terr} \cdot SD_{terr} + PDF_{fw} \cdot SD_{fw} + PDF_{mw} \cdot SD_{mw}$$

terr: terrestre

fw: acque dolci

mw: acque marine

Il numero di specie totali assunto è quello delle specie registrate (UNEP), che costituisce una parte delle forme di vita stimate sulla Terra.

- Totale specie terrestri: 1'500'000
- Totale specie acque dolci: 100'000
- Totale specie acque marine: 250'000

La stima dell'estensione superficiale e volumetrica dei tre comparti (escluse aree agricole, deserti e ghiacci per fase terrestre; profondità comparto marino, con specie viventi, pari a 200 m) per calcolo densità di distribuzione:

- Densità specie terrestri: $1,38 \text{ E-}8 \text{ (m}^{-2}\text{)}$
- Densità specie acque dolci: $7,89 \text{ E-}10 \text{ (m}^{-3}\text{)}$
- Densità specie marine: $1,82 \text{ E-}13 \text{ (m}^{-3}\text{)}$

✓ RESOURCES AVAILABILITY (RA)

Molti ritengono che il rischio che l'umanità esaurisca le risorse sia una grande problematica. In molti casi, il consumo di risorse e l'incremento della domanda di un materiale hanno un impatto diretto sui prezzi di mercato; ciò potrebbe, tuttavia, essere anche un deterrente contro lo sfruttamento delle risorse e l'espansione dei sistemi antropici sull'ambiente.

Il gruppo di lavoro UNEP-SETAC sulla valutazione degli impatti ambientali classifica le risorse in tre categorie:

- ✓ *biotic*
- ✓ *abiotic* (flow, fund, stock)
- ✓ *land*

Per la categoria *abiotic* esistono diversi metodi di valutazione di impatto:

- CML 2002*: aggregazione che si basa sul deposito D e sull'attuale consumo U delineando tre espressioni alternative (1/D; U/D; 1/D·U/D). Svantaggio: la misura di D è afflitta da incertezza.
- Eco-indicator'99*: aggregazione basata sugli interventi ambientali causati dai futuri processi (ipotetici). Riferimento: surplus energetico per la futura estrazione di risorse di bassa qualità. Svantaggio: incertezza legata all'aspetto predittivo di scenari futuri.
- Exergia*. Svantaggio: l'exergia misura una proprietà fisica di una risorsa che riflette gli sforzi di produrre tale risorsa indipendentemente dalla sua scarsità. Pertanto, anche se una risorsa scompare rapidamente, il valore di exergia non cambia. L'indicatore non esprime propriamente la scomparsa della risorsa.

ReCiPe 2008 non impiega nessuno dei precedenti metodi, ma considera come base la distribuzione geologica di minerali e risorse fossili, e valuta come l'uso di tali risorse possa causare cambiamenti marginali nelle estrazioni future. A differenza di *Eco-indicator'99*, non è valutato il surplus di energia richiesto nel prossimo futuro, ma piuttosto è considerato l'incremento marginale nel costo dovuto all'estrazione di una risorsa. La funzione sviluppata riflette l'aumento di prezzo dell'estrazione derivante proprio dall'estrazione stessa.

Il *costo marginale di incremento* (MCI) è il fattore che rappresenta l'aumento del costo di una *commodity* r (\$/kg), dovuto all'estrazione o resa (kg) di una risorsa r . L'unità di misura per MCI è \$/kg².

$$MCI_r = \frac{\Delta Cost_r}{\Delta Yield_r}$$

Il prezzo che aumenta (\$/kg) deve essere moltiplicato per un fattore che esprime la quantità consumata. In questo modo si è in grado di convertire l'estrazione di una risorsa in aumento del costo nella società. In principio ogni estrazione causa un aumento del prezzo.

Il Net Present Value (NPV) della spesa di un dollaro l'anno per un tempo T, considerando il tasso di sconto d , può esser scritto così:

$$NPV_T = \sum_T \frac{1}{(1-d)^T}$$

Il costo totale dovuto all'estrazione è quindi calcolato moltiplicando il costo marginale di incremento per la produzione globale della risorsa all'anno kg/yr (P_r) e il NPV di un dollaro, considerando l'inflazione.

La formula risultante per il danno (D) è:

$$D = MCI * P_r * NPV$$

La percentuale assunta di default per l'inflazione è pari al 3% e il tempo è assunto indefinito. D è espresso in \$/kg estratto.

L'obiettivo principale del metodo ReCiPe 2008 è quello di relazionare i dati di inventario ad uno o ad un gruppo di categorie *midpoint*, per poi collegare ciascun midpoint con una categoria *endpoint* (Figura 36).

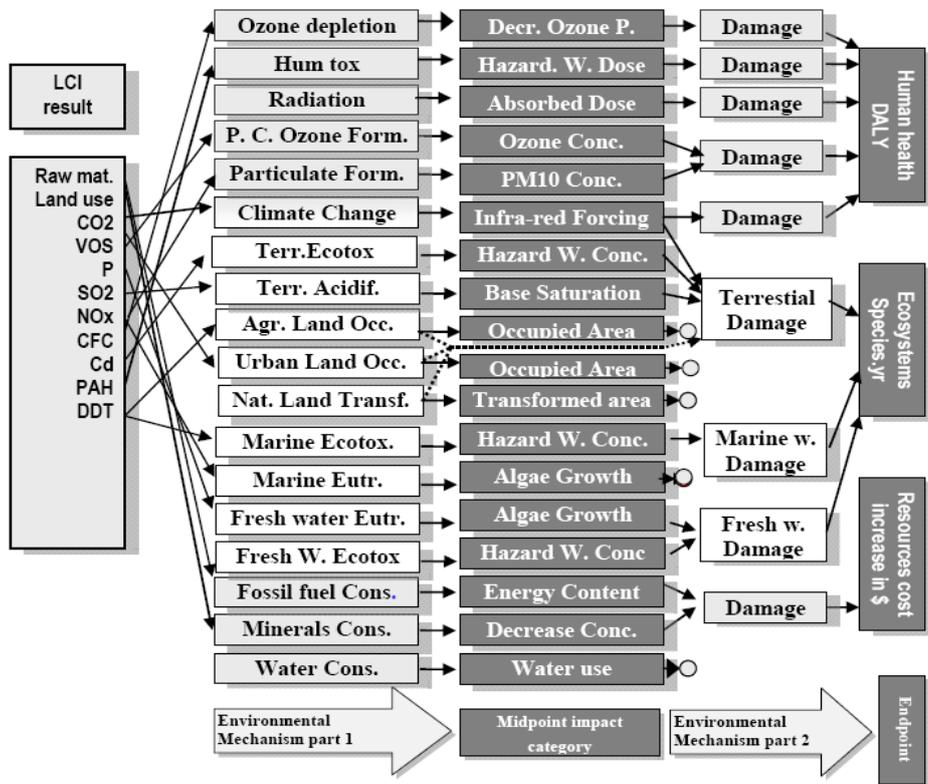


Figura 36 Relazione tra i parametri di LCI (sinistra), indicatori midpoint (centro) ed indicatori endpoint (destra) [42]

In termini di fattore di caratterizzazione è bene sottolineare che ne sono necessari due gruppi: uno per convertire un risultato di indicatore midpoint in un risultato di indicatore endpoint, l'altro per convertire un carico ambientale (emissione, estrazione, uso del suolo, ecc.) direttamente in un risultato di indicatore endpoint. I due gruppi sono relazionati dalla seguente espressione:

$$Q_{ei} = \sum_m Q_{em} \cdot Q_{mi}$$

La combinazione di un carico ambientale “i” con un indicatore midpoint “m” dà origine al fattore di caratterizzazione Q_{mi} , mentre quando l'indicatore “m” si combina con l'indicatore endpoint “e” formano il fattore di caratterizzazione Q_{em} . La combinazione di questi due dà vita al fattore di caratterizzazione Q_{ei} .

Ad esempio un carico ambientale (i) potrebbe essere il cambiamento climatico, mentre il suo fattore di caratterizzazione di midpoint (Q_{mi}) il potenziale di riscaldamento globale, GWP, (Tabella 9).

Impact category		Characterisation factor	
Abbreviation	Unit*	Name	Abbreviation
CC	kg (CO ₂ to air)	global warming potential	GWP
OD	kg (CFC-11 ⁵ to air)	ozone depletion potential	ODP
TA	kg (SO ₂ to air)	terrestrial acidification potential	TAP
FE	kg (P to freshwater)	freshwater eutrophication potential	FEP
ME	kg (N to freshwater)	marine eutrophication potential	MEP
HT	kg (14DCB to urban air)	human toxicity potential	HTP
POF	kg (NMVOC ⁶ to air)	photochemical oxidant formation potential	POFP
PMF	kg (PM ₁₀ to air)	particulate matter formation potential	PMFP
TET	kg (14DCB to industrial soil)	terrestrial ecotoxicity potential	TETP
FET	kg (14DCB to freshwater)	freshwater ecotoxicity potential	FETP
MET	kg (14-DCB ⁷ to marine water)	marine ecotoxicity potential	METP
IR	kg (U ⁻²³⁵ to air)	ionising radiation potential	IRP
ALO	m ² ×yr (agricultural land)	agricultural land occupation potential	ALOP
ULO	m ² ×yr (urban land)	urban land occupation potential	ULOP
NLT	m ² (natural land)	natural land transformation potential	NLTP
WD	m ³ (water)	water depletion potential	WDP
MRD	kg (Fe)	mineral depletion potential	MDP
FD	kg (oil [†])	fossil depletion potential	FDP

* The unit of the impact category here is the unit of the indicator result, thus expressed relative to a reference intervention in a concrete LCA study.

† The precise reference extraction is “oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground”.

Tabella 9 Categorie midpoint e fattori di caratterizzazione metodo Recipe2008 [42]

Ovviamente i fattori di caratterizzazione esistono anche per le categorie di endpoint (Q_{ei}), ma essi non hanno abbreviazioni. Per comodità possiamo usare: human health factor (HHF, $i =$

danno alla salute umana), ecosystem quality factor (EQF, i = danno all'ecosistema) e resources availability factor (RAF, i = danno alla disponibilità di risorse).

La Tabella 11 mostra chiaramente la connessione tra gli indicatori di *midpoint* ed *endpoint*. Ogni segno + presente nelle tre colonne corrisponde alla presenza di un fattore di caratterizzazione (connessione quantitativa). Come mostra la tabella non per tutte le categorie midpoint e endpoint sono state stabilite delle interconnessioni quantitative, come per la categoria eutrofizzazione marina, per la quale è presente solo il segno -.

Midpoint impact category Name	abbr.	Endpoint impact category*		
		HH	ED	RA
climate change	CC	+	+	
ozone depletion	OD	+	-	
terrestrial acidification	TA		+	
freshwater eutrophication	FE		+	
marine eutrophication	ME		-	
human toxicity	HT	+		
photochemical oxidant formation	POF	+	-	
particulate matter formation	PMF	+		
terrestrial ecotoxicity	TET		+	
freshwater ecotoxicity	FET		+	
marine ecotoxicity	MET		+	
ionising radiation	IR	+		
agricultural land occupation	ALO		+	-
urban land occupation	ULO		+	-
natural land transformation	NLT		+	-
water depletion	WD			-
mineral resource depletion	MRD			+
fossil fuel depletion	FD			+

* Legend: + means that a quantitative connection has been established for this link in ReCiPe 2008; - means that although this is an important link, no quantitative connection could be established.

Tabella 11 Connessione tra categorie midpoint e endpoint [42]

Lo stadio successivo consiste nella conversione dei fattori di caratterizzazione in indicatori di risultato (I), attraverso i quali mostrare i risultati in termini di indicatori midpoint ed endpoint. Per i fattori di caratterizzazione midpoint l'indicatore I_m si ottiene attraverso tale espressione:

$$I_m = \sum_i Q_{mi} \cdot m_i$$

dove m_i è la magnitudine del carico i -esimo.

Per i fattori di caratterizzazione endpoint ci sono due metodi di procedere, il primo che permette di ottenere l'indicatore (I_e) senza passare per l'intermedio di midpoint:

$$I_e = \sum_i Q_{ei} \cdot m_i$$

mentre l'altro metodo passa attraverso l'intermedio di midpoint, per ottenere lo stesso risultato.

$$I_e = \sum_i Q_{em} \cdot I_m$$

5.2.3.2 Il concetto di “Cultural Theory”

Ovviamente per rendere l'analisi LCA il più attendibile possibile, è necessario ridurre il grado di soggettività a cui è sottoposta, garantendo una scientificità maggiore dello studio. Per il metodo ReCiPe2008, come per l'Eco-indicator'99, ciò è possibile prendendo in considerazione il modello della “*Cultural Theory*”, proposto da Thompson (Pré Cosultant, 2001). L'ideatore ha raggiunto questa teoria tenendo conto dei comportamenti delle persone rispetto a due principi fondamentali dell'esistenza umana: l'attaccamento al gruppo e il grado di indipendenza nei confronti di imposizioni e prescrizioni esterne. Ovviamente combinando questi aspetti in modo differente otteniamo diversi atteggiamenti (“*way of life*”). Questo modo di essere e di comportarsi influirà senza alcun dubbio sulle scelte e sull'insieme di valori di ogni individuo e del gruppo cui appartiene.

Lo scopo del modello non è quello di limitare la capacità di pensiero e comportamento delle persone, ma abbassare il grado di soggettività nell'attribuire priorità alle categorie di impatto. Ciò è possibile attraverso cinque modelli su cui basare questa teoria.

1. Individualista (*Individualist*): persona svincolata da qualsiasi legame, pertanto dal suo punto di vista tutto è provvisorio e soggetto a negoziazione.
2. Ugualitario (*Egalitarian*): personaggio fortemente attaccato al gruppo, ma non ai suoi vincoli.
3. Gerarchico (*Hierarchist*): soggetto che possiede forti legami sia con il gruppo che con le sue regole.
4. Fatalista (*Fatalist*): persona fortemente vincolata alle prescrizioni del gruppo, ma ugualmente allo stesso.
5. Autonomista (*Autonomist*): soggetto che rifiuta l'influenza del gruppo e delle sue prescrizioni.

Nella Tabella 12 successiva si riportano le opzioni che ogni prospettiva associa a ciascuna categoria midpoint. Da notare che vengono riportate esclusivamente le prime tre categorie, individualista, ugualitario e gerarchico, poiché risultano le più comuni.

Per i modelli scelti nel metodo ReCiPe2008 si rimanda alla Parte Sperimentale.

Tabella 12 Opzioni per ogni prospettiva in relazione alle categorie d'impatto midpoint [42]

To midpoint impact category:	Perspectives		
	I	H	E
climate change	20-yr time horizon	100 yr	500 yr
ozone depletion	–	–	–
terrestrial acidification	20-yr time horizon	100 yr	500 yr
freshwater eutrophication	–	–	–
marine eutrophication	–	–	–
human toxicity	100-yr time horizon organics: all exposure routes metals: drinking water and air only only carcinogenic chemicals with TD ₅₀ classified as 1, 2A, 2B by IARC	infinite all exposure routes for all chemicals all carcinogenic chemicals with reported TD ₅₀	infinite all exposure routes for all chemicals all carcinogenic chemicals with reported TD ₅₀
photochemical oxidant formation	–	–	–
particulate matter formation	–	–	–
terrestrial ecotoxicity	100-yr time horizon	infinite	infinite
freshwater ecotoxicity	100-yr time horizon	infinite	infinite
marine ecotoxicity	100-yr time horizon sea + ocean for organics and non-essential metals. for essential metals the sea compartment is included only, excluding the oceanic compartments	infinite sea + ocean for all chemicals	infinite sea + ocean for all chemicals
ionising radiation	100-yr time horizon	100,000 yr	100,000 yr
agricultural land occupation	–	–	–
urban land occupation	–	–	–
natural land transformation	–	–	–
water depletion	–	–	–
mineral resource depletion	–	–	–
fossil fuel depletion	–	–	–

5.2.4 Interpretazione e miglioramento (*Interpretation*)

La fase conclusiva di un'analisi LCA consiste nell'interpretazione dei risultati e nel successivo miglioramento, volto a garantire un incremento della sostenibilità del sistema. Come ogni analisi anche quella di LCA è ricca di incertezze, che automaticamente incidono sui risultati stessi. Tale aspetto viene affrontato in quest'ultima fase, cercando di suddividere le varie tipologie di incertezze sulla base di una distinzione in tre diverse sfere:

- *Tecnosfera (Technosphere)*: consiste nella modellazione di sistemi tecnici, come ad esempio processi di produzione e di trasporto. In questo caso non si hanno incertezze superiori di un ordine di grandezza o due, inoltre quasi la totalità delle misurazioni dovrebbe essere riproducibile e verificabile.
- *Ecosfera (Ecosphere)*: ovvero comprende la modellazione di meccanismi ambientali. Solitamente si hanno incertezze che si aggirano da un minimo di uno ad un massimo di tre e molto spesso la riproducibilità risulta difficoltosa o alle volte impossibile (ad esempio il cambiamento climatico).
- *Valusfera (Valuesphere)*: si contraddistingue dalle altre a causa del grado di soggettività, poiché è una sfera che rientra nell'orbita delle scienze sociali. Pertanto in questo caso non è corretto parlare di incertezza, piuttosto di scelte logiche (come ad es. "è un valore", oppure "non è un valore").

Ovviamente esistono diversi approcci per analizzare tali incertezze, ma quelle che verranno utilizzate in tale studio sono le seguenti:

- Analisi di sensibilità
- Analisi di contributo
- Analisi di incertezza

Di seguito verranno descritte in dettaglio.

5.2.4.1 Analisi di sensibilità

Ha lo scopo di determinare l'influenza dei parametri e delle assunzioni sui risultati dell'analisi LCA. Consiste nel variare le assunzioni e ricalcolare la LCA. Potrebbe capitare che i parametri scelti abbiano magnitudo differenti sugli effetti finali; ciò comporterebbe la variazione dei carichi ambientali di alcuni prodotti. Questa situazione non è necessariamente un problema, poiché sarà necessario chiarire, nella fase di Interpretazione, entro quali criteri sono state eseguite tali scelte per garantire il range di attendibilità dei risultati.

5.2.4.2 Analisi di contributo

È un metodo che dà la possibilità di identificare quali sono i processi che rivestono un ruolo chiave nei risultati della LCA. Di fatti spesso gli studi di LCA contengono centinaia di processi, ma non tutti hanno la stessa influenza sul risultato finale, poiché solitamente i risultati sono determinati al 95 – 99% da solo una parte di essi. Attraverso i risultati di tale metodo è possibile focalizzare l'attenzione su questi processi, individuare la loro rappresentatività, completezza e se sono troppo legati ad importanti assunzioni.

5.2.4.3 Analisi di incertezza

Ogni dato è accompagnato dalla sua incertezza, pertanto è necessario utilizzare un metodo statistico che sia in grado di trattare tali incertezze ed individuare l'errore associato. Lo studio in questione propone come metodo di valutazione dell'incertezza l'Analisi Monte Carlo. In questo modo è stato possibile avvalorare le considerazioni sui risultati emersi dal lavoro.

Il metodo Monte Carlo basa il suo funzionamento su un algoritmo in grado di produrre una serie di numeri, i quali hanno una distribuzione di probabilità simile a quella del fenomeno in esame. Tale simulazione verrà ripetuta in maniera iterativa, modificando i parametri compresi in un intervallo di valori definito e registrandone le stime ottenute. Il calcolo sarà replicato per un numero statisticamente elevato di volte, ad esempio 1000 iterazioni, così da acquisire un altrettanto numero di risposte, che possiedono un significato probabilistico, spendibile per assicurare la correttezza del modello utilizzato.

Ovviamente i parametri che verranno modificati sono i dati di inventario di ciascuno scenario, mentre l'intervallo di valori entro il quale farli variare corrisponde alla loro incertezza. Essa è intesa come una stima della variabilità dei dati, estesa a tutti i fattori che possono contribuire ad alterarne il valore. Ciò significa che oltre ad includere l'errore associato alla misurazione, si tiene conto anche della mutabilità di un processo, del metodo di acquisizione e/o della composizione dell'unità funzionale.

Di seguito, in Tabella 13, viene riportata la scala di attribuzione degli errori ai singoli processi.

Tabella 13 Scala di attribuzione delle incertezze

ANALISI DI INCERTEZZA	STIMA
Dati certi	1
Dati con certezza media	1,5
Dati incerti	2

Queste tre stime di dati hanno interessato quattro differenti gamme di distribuzione, secondo la PréConsultant, 2008:

- *Distribuzione a Intervallo*: impiegata quando il parametro può assumere con egual probabilità ogni valore all'interno di un intervallo, delimitato a sua volta da un minimo ed un massimo.
- *Distribuzione Triangolare*: per utilizzare tale distribuzione è necessario conoscere sia l'intervallo di valori, sia il valore più probabile. Nel caso in cui quest'ultimo si posizioni a metà dell'intervallo, la distribuzione approssima è quella normale, altrimenti si approssima a quella lognormale. Il grande vantaggio di tale tipologia risiede nella bassa probabilità di uscita dei valori estremi, qualsiasi essi siano.
- *Distribuzione Normale*: per impiegare tale distribuzione è indispensabile precisare il valore più probabile (quello centrale) e la relativa deviazione standard; attraverso tali informazioni si ricava l'intervallo di confidenza all'interno del quale si ha la probabilità del 95% che il valore esca.
- *Distribuzione Lognormale*: è la distribuzione più nota di un'analisi LCA. Si ottiene moltiplicando i dati con distribuzione normale e si divide il valore più probabile per la varianza (il quadrato della deviazione standard) per raggiungere l'intervallo di confidenza al 95%.

Per la trattazione dei dati e la discussione dei risultati si rimanda alla Parte Sperimentale.

6. IL SOFTWARE E IL DATABASE DI RIFERIMENTO

6.1 Il software SimaPro

Nel presente lavoro di Tesi l'analisi di LCA è stata eseguita utilizzando il software **SimaPro**, versione PhD 7.2.4, sviluppato dalla Pré Consultants. È tra gli strumenti più utilizzati per l'esecuzione di tali studi, poiché, oltre a rispondere ai requisiti di conformità previsti dalla normativa ISO, è anche tra i più diffusi. Il software prevede la distinzione di un sistema in termini di:

- **Processi (*Processes*):** sono dei veri e propri «mattoni» che rappresentano lo schema operativo del sistema in esame, poiché racchiudono informazioni ambientali e sociali (emissioni nei comparti ambientali, utilizzo di materie prime, rifiuti solidi, flussi sociali, ecc.), ma anche economiche (input da altri processi, output per ogni processo, prodotti evitati, impatti economici, ecc.) sui flussi in ingresso ed uscita. Inoltre contengono documentazioni (sezioni di registrazione e commento del sistema, sezioni per gli indicatori di qualità dei dati e sezioni di documentazioni degli autori del modello) e parametri (parametri costanti ed espressioni o formule che li relazionano). I processi vengono identificati in funzione dei loro output ed è possibile relazionarli gli uni con gli altri attraverso dei sistemi di interconnessioni, visualizzabili come albero (*tree*) o rete (*network*). Ovviamente ogni processo può essere composto da un unico processo o unità di processo (*unit process*) oppure da una combinazione di più processi o sistema di processi (*system process*), a seconda delle esigenze dello studio.
- **Stadi di prodotto (*Product stages*):** permettono di descrivere la composizione di un prodotto in termini delle diverse fasi di un ciclo di vita. Per questo motivo si individuano cinque diversi stadi di prodotto:
 1. *Assemblaggio*, comprendente lista di materiali, dei processi di produzione, di trasporto ed energia;
 2. *Ciclo di vita*, include collegamenti ad un solo assemblaggio, ad un definito numero di processi, ad uno scenario di fine vita o smaltimento e a cicli di vita aggiuntivi;
 3. *Scenario di fine vita*, contiene processi che rappresentano il carico ambientale associato ad uno scenario e collegamenti a processi che specificano la destinazione dei flussi presenti (disassemblaggi, scenari di smaltimento o trattamento);

4. *Disassemblaggio*, che definisce le componenti di un assemblaggio e indirizza ciascun sub-assemblaggio ad uno specifico scenario di fine vita;
5. *Riuso*, si riferisce a processi per il riuso.

6.2 Il database Ecoinvent

Lo strumento di supporto di cui dispone il software SimaPro è il database Ecoinvent, banca dati sviluppata dallo Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Consiste in un insieme di informazioni e dati, aggiornati continuamente e consistenti con la fase di inventario di una LCA. L'Ecoinvent racchiude più di 2500 processi, incluse le relative stime di incertezza, pertanto, grazie alla sua versatilità, viene impiegato come strumento di supporto non solo in analisi di LCA, ma in molte altre procedure di gestione ambientale, tra cui: Integrated Product Policy (IPP), Environmental Product Declaration (EPD), Life Cycle Management (LCM), Design for Environment (DfE). I primi database creati per affiancare le analisi di LCA furono l'ETH-ESU 96 e il BUWAL250, che furono progressivamente aggiornati e sostituiti con all'avvento dell'Ecoinvent nel 2003. La peculiarità del database risiede nella capacità di riferirsi ai sistemi in termini di processo unitario (unit process) o sistema di processo (system process); ciò garantisce il grado di trasparenza richiesto per uno studio di LCA. Inoltre ogni processo presente nella banca dati è provvisto di una dettagliata descrizione; in questo modo è possibile avere delle informazioni in merito alla qualità dei dati (in termini di correlazione geografica, temporale e tecnologica), nonché di rappresentatività e metodo di acquisizione. Per facilitare l'individuazione dei processi desiderati, l'Ecoinvent prevede una catalogazione di questi ultimi in macrocategorie: energia, materiali, trasporto, elaborazioni ed uso; ogni processo è attribuito al settore più consono. Un altro aspetto importante è la possibilità di specificare le emissioni per *sottocampionamento*, cioè specificare quale zona interessino maggiormente, ad esempio per le emissioni in atmosfera definire se esse hanno maggiori impatti in zone altamente o mediamente popolate o in stratosfera. Questo grado di dettaglio va oltre i requisiti previsti dalle ISO 14040 e 14044 per una LCA, tuttavia ci si aspetta che in futuro possa suscitare maggiore interesse. La versione di database utilizzata come riferimento per questo studio è: Ecoinvent 2.1, aggiornata all'anno 2011.

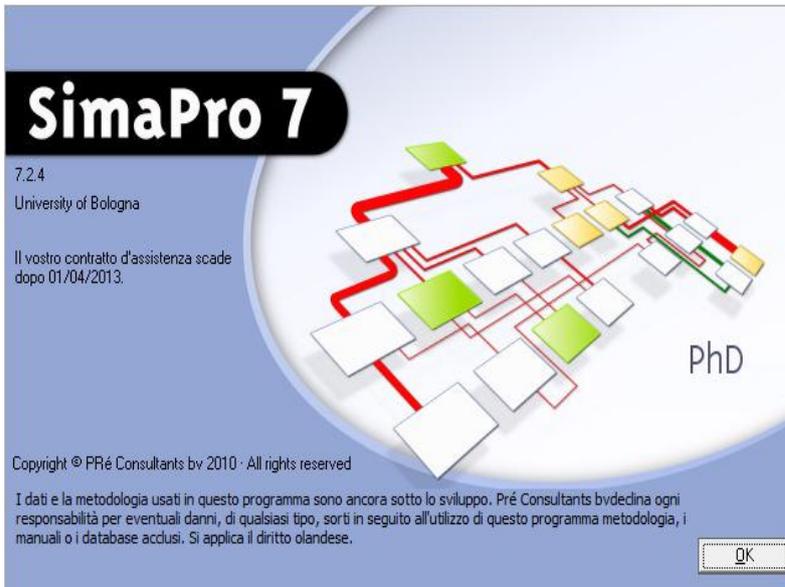


Figura 37 Software e database utilizzati (fonte: Prè Consultants ed Ecoinvent)

PARTE SPERIMENTALE

7. ANALISI DEL CICLO DI VITA, ASPETTI COMUNI A TUTTI GLI SCENARI

Questa sezione consiste nella parte sperimentale del lavoro di tesi, che nel caso di uno studio LCA comprende la fase di raccolta dati, le interpretazioni ed assunzioni fatte per la modellazione di scenari, la costruzione dei vari processi, l'ottenimento e l'interpretazione dei risultati. Per rendere più comprensibile e coerente il lavoro, tutte le scelte ed assunzioni attuate verranno presentate di seguito nell'ordine previsto dalla struttura concettuale di una LCA: *Goal and Scope definition*, *Life Cycle Inventory (LCI)*, *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* e *Interpretation*. Come accennato in precedenza lo studio è stato condotto attraverso l'utilizzo del software SimaPro 7.2.4, mentre come database la scelta è ricaduta nella banca dati Ecoinvent 2.0; per maggiori dettagli su entrambi si rimanda alla sezione precedente.

7.1 Definizione degli obiettivi e degli scopi

7.1.1 Definizione degli obiettivi

Come accennato nella parte generale dello studio tale lavoro nasce nell'ambito del progetto LENS con l'obiettivo di indagare la rilevanza per l'ambiente e per la salute umana di metodi di riscaldamento domestico, che utilizzano come combustibile la biomassa legnosa (legna e pellet), attraverso la metodologia di Valutazione del Ciclo di Vita, o *Life Cycle Assessment (LCA)*; questo approccio integra gli studi di monitoraggio ambientale e di analisi dei campioni, fornendo dei risultati ad ampio raggio dei fenomeni presi in esame, così da poter formulare delle previsioni su quelli che possono essere i loro impatti. Le ragioni che hanno spinto ad investire su questo studio sono state sia il crescente aumento di tali tecnologie nella realtà italiana, specialmente in quella di città, sia la volontà di verificare quali possono essere i carichi ambientali associati all'utilizzo di metodi di produzione di energia da fonti rinnovabili. Quest'ultimo aspetto ha una grande rilevanza, da un lato perché l'utilizzo di biomasse, essendo materiale rinnovabile, contribuirebbe a rientrare nei requisiti previsti nella direttiva 2009/28/CE, dall'altro perché a causa delle emissioni associate all'impiego di tali tecniche la Regione Lombardia si è vista costretta a vietarne temporaneamente l'utilizzo, pertanto conoscere quali siano i carichi ambientali aiuterebbe l'opinione pubblica a condividere o contrastare la scelta adottata dalla Regione, in base ad i risultati ottenuti. Inoltre lo scopo dello studio è anche quello di porre a confronto metodi di riscaldamento domestico alimentati con biocombustibili, con altre tipologie di riscaldamento delle abitazioni. In questo modo si ottiene una visione complessiva dell'intero scenario italiano e si è in grado di fornire un'opinione critica in merito alle assunzioni ed ai risultati ottenuti.

7.1.2 Definizione degli scopi

In questa sezione vengono riportati tutti i criteri adottati per tale studio di LCA, rispettando i principi riportati nelle normative ISO 14040 e 14044.

7.1.2.1 Definizione dei confini di sistema

Di seguito verranno elencati tutti i principi adottati per definire con esattezza i confini di sistema, secondo i criteri che sono già stati anticipati nella parte generale del lavoro.

7.1.2.1.1 Confini del ciclo di vita

Il presente studio è un'analisi LCA su modello *from cradle to grave*, condotta cioè sull'intero ciclo di vita del processo di produzione di calore per il riscaldamento domestico.

In merito a quanto detto nel paragrafo relativo agli obiettivi, i confini del sistema sono stati concepiti in modo da poter suddividere lo studio in due livelli. Un primo livello, più dettagliato ed alla base del lavoro, che si riferisce ai metodi di riscaldamento domestico alimentati a biocombustibili; un secondo livello, considerato un'estensione dei confini, che è rivolto al confronto con scenari alternativi per il riscaldamento delle abitazioni.

7.1.2.1.2 Confini geografici

In merito a quanto detto nel paragrafo precedente, indagare l'intero ciclo di vita di processi per la produzione di calore consiste, da un punto di vista di *confini geografici*, nel comprendere al loro interno tutti i processi e i flussi di materiali ed energia necessari alla produzione del combustibile e delle tecnologie e i relativi processi di smaltimento. Per ciascun processo di produzione di energia termica si avranno dei confini geografici specifici rispetto alla tipologia di combustibile impiegato (produzione ed utilizzo) ed alla tecnologia adoperata (costruzione, modalità di produzione di calore e scenario di fine vita).

7.1.2.1.3 Confini di carico ambientale

In questo studio sono stati considerati tutti i bilanci e i legami tra il sistema in esame e l'ambiente; ciò è stato possibile non ponendo nessuna limitazione ai confini di carico ambientale, ma comprendendo l'intera lista di input ed output.

7.1.2.1.4 Confini temporali

I confini temporali di questo studio si riferiscono ai limiti impiegati nell'ottenimento dei dati. In questo caso bisogna fare una netta distinzione: gli scenari di riscaldamento domestico a biomassa sono stati modellati attraverso l'utilizzo di dati ed informazioni relativi al periodo 2004-2011; invece, i processi di riscaldamento domestico alternativi, utilizzati come confronto diretto, sono stati in parte modellati con dati recenti, periodo 2004-2011, ma per la

grande maggioranza le informazioni derivano da dati già presenti nel database, che fanno riferimento ad un periodo temporale precedente. Laddove, in entrambi i casi, ciò non sia stato possibile, è stata eseguita un'espansione del periodo temporale, mai comunque superiore ad un periodo di dieci anni.

7.1.2.2 Definizione dell'unità funzionale

La scelta dell'unità funzionale, alla quale riferire tutti i flussi di materia ed energia ed i relativi carichi ambientali, è stata eseguita valutando la *mission* e gli obiettivi dello studio. Inoltre, prima di individuare la nostra unità funzionale sono state esaminate le scelte fatte in lavori analoghi. Ad esempio nello studio *LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy)*, condotto da S. Caserini, S. Livio, M. Giugliano, M. Grosso, L. Rigamonti (2010), che aveva l'obiettivo di comparare gli impatti ambientali derivanti dall'utilizzo di biomasse in sistemi per il riscaldamento domestico, in sostituzione ai combustibili tradizionali, è stata impiegata come unità funzionale *1 tonnellata di biomassa secca*. In questo modo hanno riferito tutti i risultati relativi agli impatti, evitati e non, in termini di massa/massa (es. kg di CH₄ per ton di biomassa secca).

L'approccio seguito nel nostro studio è stato decisamente diverso, poiché dovevamo individuare un'unità funzionale che ci avrebbe permesso di svincolare il nostro lavoro dalla massa di combustibile consumato, permettendoci di estendere i confini di sistema al confronto con altri metodi di riscaldamento domestico per i quali sarebbe stato impossibile riferire i processi alla massa di biomassa secca (es. solare termico). Pertanto la nostra scelta è ricaduta su: *IMJ di energia termica prodotta* da ogni strumentazione. In questo modo è stato possibile modellare ciascuno scenario riferendo tutti i flussi, in entrata ed uscita, alla quantità di energia prodotta dal processo di combustione, garantendo un metodo valido anche per una possibile estensione ad altri scenari. Per ulteriori dettagli vedere il paragrafo relativo alla modellazione dei singoli scenari.

7.1.2.2 Infrastrutture e smaltimento

Come accennato precedentemente nel paragrafo relativo ai confini geografici lo studio si riferisce anche ai processi e materiali utili per la costruzione e lo smaltimento delle tecnologie utilizzate per riscaldare l'abitazione. Ovviamente ciascuno scenario avrà dei flussi e dei processi specifici per i quali si è proceduto ad una raccolta delle informazioni nel modo più puntuale ed accurato possibile, tenendo a mente che l'impatto dovuto all'infrastruttura influisce solo in minima parte sul risultato complessivo.

7.1.2.3 Trasporti

Ovviamente le fasi di: approvvigionamento di materiali, produzione di combustibili e costruzione delle tecnologie richiedono necessariamente delle movimentazioni, i cosiddetti *trasporti*. Nel software scelto per eseguire l'analisi LCA il metodo adottato per valutare l'impatto associato ai trasporti è quello di moltiplicare la distanza percorsa, espressa in km, per la massa di materiali trasportata, espressa in tonnellate, ottenendo le *t·km*. In questo modo si mette in luce la relazione di proporzionalità che lega la massa alla distanza. Nell'ottica di un'analisi di intero ciclo vita, nel processo di trasporto vengono incluse le operazioni di:

- produzione, mantenimento e smaltimento del veicolo;
- carico e scarico;
- costruzione, mantenimento e smaltimento del manto stradale;

mentre caratteristici per ogni scenario di riscaldamento saranno i mezzi di trasporto adottati e le distanze percorse. Per maggiori dettagli vedere il paragrafo relativo ai trasporti di ogni processo.

8. ANALISI DI INVENTARIO, MODELLAZIONE SCENARI DI RISCALDAMENTO DOMESTICO A BIOMASSA

In questo capitolo sono riportate tutte le scelte metodologiche adottate per la modellazione degli scenari di riscaldamento domestico a biomassa. Ogni aspetto verrà discusso e motivato in dettaglio, così da fornire informazioni sufficienti per comprendere le ipotesi effettuate.

Inoltre, in accordo con gli obiettivi del lavoro di tesi e con le finalità del progetto LENS, è bene precisare che nella scelta delle tecnologie, indispensabile per la conseguente modellazione del processo, si è fatto riferimento a quelle che sono le BAT, *Best Available Techniques*, attualmente presenti nel mercato di riferimento italiano.

8.1 Aspetti comuni nella modellazione degli scenari a biomassa

Indagare il comportamento di tecniche di riscaldamento domestico a biomassa è stato recentemente obiettivo di molti studi condotti in Italia, prendendo come riferimento quello che era avvenuto nella regione Lombardia. Uno dei tanti è il lavoro *Estimation of residential wood combustion in the Lombardy Region*, eseguito da Cinzia Pastorello e Panagiota Dilara, redatto per European Commission-JRC (Joint Research Centre) 2008, nato proprio in seguito ad indagini, eseguite dall'ente ARPA Lombardia, che hanno mostrato delle perplessità sulle emissioni derivanti dall'utilizzo di biocombustibili in utenze domestiche civili. L'obiettivo che detto lavoro si prefissava era di acquisire informazioni più dettagliate, mediante un sondaggio, sull'utilizzo di legna per riscaldamento domestico ad uso familiare. Questo studio è stato un punto di partenza per il nostro lavoro, fornendoci utili informazioni per la fase di modellazione degli scenari.

È emerso che su un totale di 3.652.954 famiglie lombarde (ISTAT, 2004) il 16,4% (597.875) utilizza "legna da ardere", termine con il quale si indica la legna e i suoi derivati utilizzati come combustibile, sia per cottura che per riscaldamento. Il consumo totale di combustibile all'anno per abitazione risulta di 3,68 t, ma considerando che solo il 25% di esso è destinato alla cottura le biomasse adibite alla produzione di calore saranno il restante 75%, cioè 2,76 t. È bene sottolineare che il 49,6% delle abitazioni, che usano la legna o derivati per riscaldamento domestico più di quattro volte l'anno, utilizza strumenti tradizionali (camino aperto 23,7% e stufa tradizionale a legna) mentre il 31,7% strumenti innovativi (caminetto chiuso 21,9%, stufa automatica a pellet 4,8% e stufa innovativa a legna 5%). Queste percentuali ci fanno riflettere sul trend italiano. Di fatti si nota immediatamente come la percentuale degli strumenti innovativi sia di molto inferiore rispetto a quella delle altre apparecchiature, ma nonostante quest'andamento il nostro studio si focalizza su questa

porzione. La motivazione che ci ha condotto in tale direzione è stata la volontà di indagare delle tecnologie che a breve diverranno la colonna portante di un mercato sempre più rivolto alla sostenibilità ed al rispetto per l'ambiente.

La grande differenza che distingue strumenti tradizionali da strumenti innovati è l'efficienza di combustione nominale o più in generale espressa in termini di “*potenza termica convenzionale*” di un generatore di calore, che rappresenta la potenza termica del focolare diminuita della potenza termica persa al camino (UNI 10389/94). In genere per strumenti tradizionali è molto più bassa e ciò comporta un incremento del combustibile da alimentare alla stufa; inoltre, una combustione non molto efficiente si ripercuote sulle emissioni al camino, che saranno necessariamente superiori. Per la modellazione degli scenari a biomassa ci si è riferiti alle informazioni tecniche riportate nel lavoro *Lot 15- Solid fuel small combustions installations- Task 5: Base Cases*, European Commission DG TREN, Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs(II), pubblicato a Giugno 2009. Nel presente lavoro si è studiato il comportamento di due tecnologie, una alimentata a legna e l'altra a pellet, appartenenti entrambe alla categoria delle *BAT* (European Commission, 2009 [34;35]); in particolare abbiamo scelto di indagare il comportamento della **stufa innovativa a legna** e della **stufa a pellet**. Per entrambe le tecnologie è stato deciso di riferirsi, in accordo con le specifiche riportate nel *Lot 15- Solid fuel small combustions installations- Task 5: Base Cases* ai valori di **efficienza mediata sull'utilizzo annuale della tecnologia** (per semplicità in seguito verrà definita semplicemente *efficienza media*), quello che in inglese è definito *estimated net fuel use efficiency*. Tale parametro è definito come l'efficienza netta mediata lungo tutto l'arco dell'anno, comprensiva di operazioni di carico e transienti, del calo annuale delle performance di combustione, ecc. Esso permette di individuare l'efficienza reale che le apparecchiature possiedono nel convertire il combustibile in calore utile, nelle condizioni operative reali. Per queste motivazioni viene spesso utilizzato negli *ECOREPORT*, per determinare gli impatti ambientali al posto dell'efficienza nominale.

8.1.1 Ammontare di combustibile ed emissioni

Come accennato precedentemente nel paragrafo relativo all'unità funzionale, la massa e di conseguenza il volume di legname da impiegare nella modellazione del processo sono stati individuati in relazione a quella che è la nostra unità funzionale; inoltre si è tenuto conto anche delle caratteristiche chimico-fisiche del combustibile. Ciò si traduce nel quantificare l'ammontare utile per l'ottenimento di 1 MJ termico conoscendo il PCI e la densità del combustibile. Per ottenere risultati soddisfacenti è necessario prendere in considerazione

anche il rendimento di combustione dello strumento adoperato, ma, mentre la relazione che lega il PCI e la densità con l'ammontare in kg e m³ è banale, per l'efficienza di combustione media è più complessa. Pertanto in prima analisi abbiamo ipotizzato che essa sia inversamente proporzionale al quantitativo di combustibile da impiegare e di conseguenza abbia la stessa relazione anche con le emissioni prodotte dalla combustione, trovando successivamente conferma di tale procedimento nel documento *Lot 15- Solid fuel small combustions installations- Task 5: Base Cases* European Commission DG TREN, in cui gli operatori seguono lo stesso metodo.

8.1.2 Verifica incidenza della costruzione della tecnologia

Attraverso un'analisi mediante software è stato possibile verificare, in entrambi i casi, l'incidenza, in termini di carichi ambientali, della costruzione dell'infrastruttura (stufa) sull'intero processo di riscaldamento domestico. Prima di procedere è stato verificato che l'incidenza degli scenari di smaltimento delle infrastrutture, contenuti all'interno dei processi oggetto d'indagine, sia trascurabile (< 1%). Successivamente, per poter rappresentare l'incidenza della costruzione è stato necessario riportare i risultati in istogramma e modificare l'andamento delle ordinate, così da rendere visibile il processo di nostro interesse, riportato in rosso.

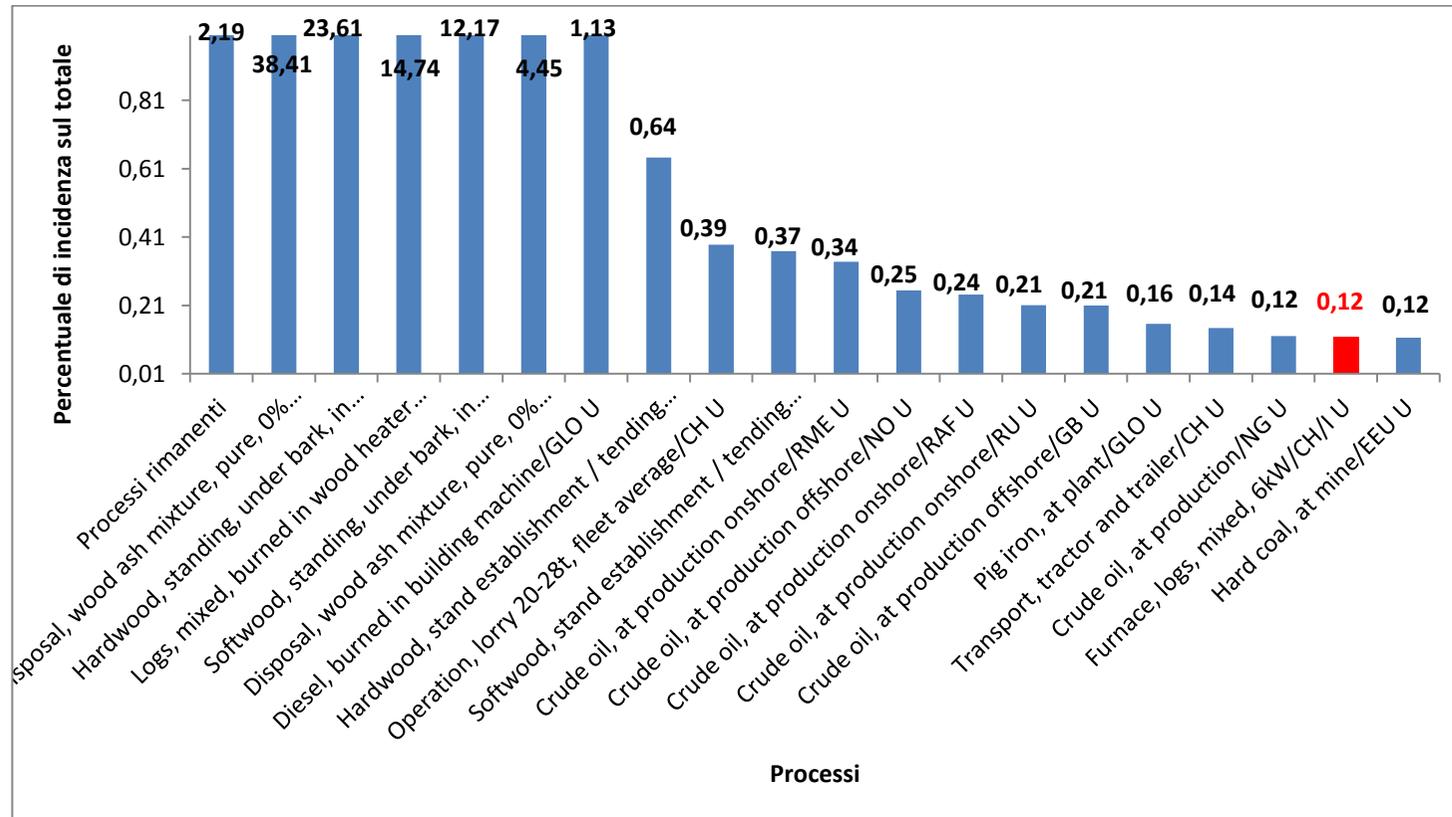


Figura 38 Incidenza percentuale della costruzione della stufa a legna

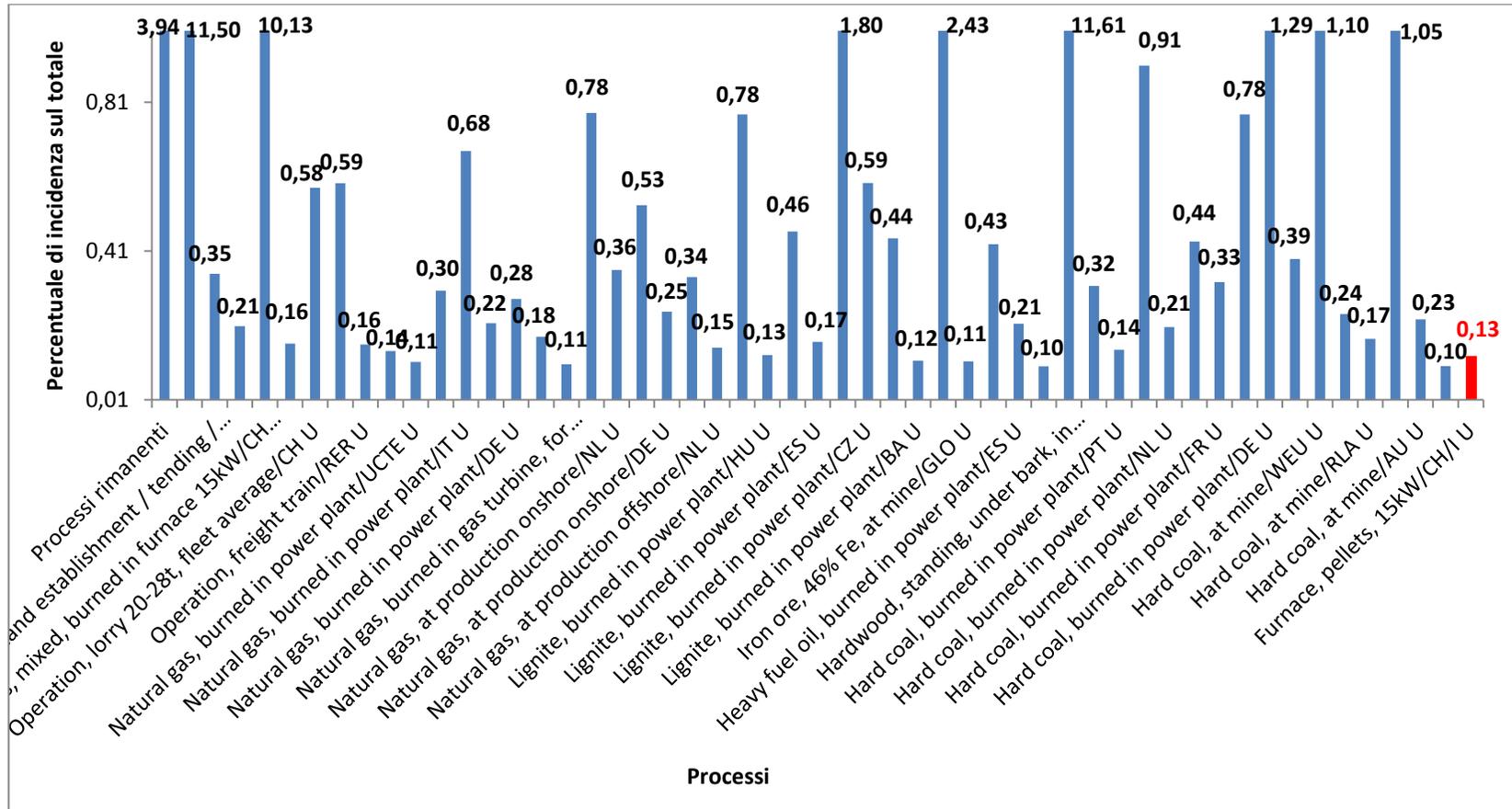


Figura 39 Incidenza percentuale della costruzione della stufa a pellet

Osservando i grafici si nota che gli stadi di costruzione, in entrambi gli scenari, incidono per un valore molto vicino allo 0,1% del totale; ciò conferma la nostra ipotesi e la nostra scelta di trascurare l'accuratezza nella raccolta di dati inerenti a tale fase. Le informazioni che verranno riportate nei seguenti paragrafi sono frutto di dati raccolti da letteratura, ipotesi ed assunzioni fatte durante tutta la fase di raccolta dati e modellazione degli scenari.

8.2 Modellazione Scenario di *Riscaldamento domestico con stufa innovativa a legna*

8.2.1 Combustibile

8.2.1.1 Composizione e caratteristiche chimico fisiche

Il combustibile preso in esame, per essere impiegato nelle suddette stufe, è costituito dai tronchi di legna, quelli che in inglese vengono denominati *logs*. Secondo un'indagine ISTAT condotta nel 2008, la legna impiegata nella regione Lombardia per fini di riscaldamento domestico è prevalentemente composta di latifoglie (Tabella 13), piante, arboree o arbustive, erbacee o legnose, caratterizzate da foglie larghe a prescindere dalla loro forma. Queste rappresentano circa il 93% del totale, anche se i dati riportati nella tabella sono comprensivi anche del legname utilizzato per produrre carbone e carbonella. Inoltre secondo l'INCF - *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*- risulta che per la famiglia delle latifoglie, le specie più rappresentative sono il faggio (*hardwood*) e il pioppo (*softwood*), pertanto questa informazione ci dà la possibilità di avvalorare la nostra scelta di assumere che la legna abbia una composizione ripartita al 50%:50% tra soft- e hardwood. Questa ripartizione percentuale determina automaticamente la **densità** media della legna così composta. Da Ecoinvent si hanno informazioni relative ai valori di densità delle due categorie di legname: rispettivamente si ha che il legno *softwood* possiede un peso specifico di 540kg/m^3 , mentre l'*hardwood* di 780kg/m^3 , pertanto la media aritmetica tra le due risulta essere 660kg/m^3 . Da notare che i valori riportati da Ecoinvent sono mediati, poiché il valore di densità varia di molto in base alla tipologia di legno.

Per quanto riguarda un'altra caratteristica chimico-fisica come **l'umidità percentuale** abbiamo mantenuto il 20%, valore di default impostato dai creatori dei processi. Questo è stato possibile grazie alla conferma dataci da molte fonti di letteratura (Ilarioni, 2007; Bonoli, 2007; UNI 2011) del fatto che la percentuale di umidità nella legna è molto variabile ed influenzata dalla tipologia di legname, ma in media si aggira attorno a valori compresi tra il

20% e il 50%. Ovviamente nel nostro caso abbiamo anche tenuto conto di una fase di essiccazione che precede quella di vendita del combustibile.

Altra caratteristica fondamentale della legna è il **potere calorifico**. Esso indica quanto calore è possibile ottenere dalla combustione completa di un kg di sostanza a 0 °C e 1 atm e pertanto si misura in J/kg oppure in cal/kg. Si differenzia in potere calorifico *superiore* ed *inferiore*, poiché il primo (PCS) è definito come la *quantità di calore che si rende disponibile per effetto della combustione completa a pressione costante della massa unitaria del combustibile, quando i prodotti della combustione siano riportati alla temperatura iniziale del combustibile e del comburente*; mentre il secondo (PCI) come il *potere calorifico superiore diminuito del calore di condensazione del vapore d'acqua durante la combustione*. Questo perché nelle combustioni normali i prodotti della combustione sono rilasciati a temperatura più alta di quella di riferimento del combustibile. Così, una parte del calore teoricamente disponibile si 'disperde' per il riscaldamento dei fumi e, soprattutto, per la vaporizzazione dell'acqua prodotta dalla combustione.

Ovviamente quello di cui viene tenuto maggiormente conto nei processi di combustione è il *potere calorifico inferiore*. Nella modellazione del processo in esame abbiamo mantenuto il dato di default, mediandolo in base alla ripartizione 50/50 delle due tipologie di legna ottenendo un PCI medio di 13 MJ/kg.

Province	Utilizzazioni in foresta					
	Conifere			Latifoglie		
	Legname da lavoro	Legname per uso energetico	Perdite di lavorazione in foresta	Legname da lavoro	Legname per uso energetico	Perdite di lavorazione in foresta
Lombardia						
Varese	4.178	3.180	478	15.856	74.816	4.412
Como	6.270	2.482	570	8.450	45.094	2.623
Sondrio	32.138	6.580	2.328	2.314	20.836	1.157
Milano	229	160	25	32.041	21.695	898
Bergamo	30.824	9.612	2.629	12.582	72.899	4.200
Brescia	34.536	10.577	2.933	15.016	71.502	4.185
Pavia	6.203	2.280	552	256.265	76.639	1.087
Cremona	-	-	-	80.858	20.729	65
Mantova	-	-	-	145.585	25.737	36
Lecco	1.513	576	135	4.945	22.087	1.336
Lodi	-	-	-	34.704	14.712	47
Totale Lombardia	115.891	35.447	9.650	608.616	466.746	20.046

Fonte: Istat, tagliate e utilizzazioni legnose forestali

Tabella 13 Utilizzazioni forestali per tipo di bosco e per destinazione (in m³). Dettaglio per provincia – anno 2008 [50]

8.2.1.2 Approvvigionamento

Nei criteri previsti da un'analisi dell'intero ciclo di vita abbiamo tenuto in considerazione la fase di produzione del legname. In questo caso la filiera comprende tutti i processi, materiali e carichi relativi alla fase di esbosco, a quella di riduzione delle dimensioni per l'ottenimento dei ceppi ed infine alla vendita al consumatore finale. Per maggiori dettagli relativi alla descrizione delle fasi che costituiscono la filiera del legno si rimanda alla sezione introduttiva paragrafo *La filiera bosco-legna-energia*. Inoltre nel paragrafo 8.2.6 è riportato uno scenario alternativo nel quale si prende in considerazione la possibilità di utilizzare sfalci di potature come combustibile, sottolineando vantaggi e svantaggi di tale risorsa.

8.2.2 Trasporto

I processi di trasporto considerati nello scenario di riscaldamento con stufa a legna sono semplicemente due: uno che caratterizza la fase di esbosco ed un altro dalla zona di stoccaggio al consumatore finale. Per modellare il trasporto della fase di esbosco si è ipotizzata una distanza massima di 10 km coperta con trattore (Bonoli, 2007), ciò è confermato dal fatto che l'esbosco con trattori risulta il metodo più diffuso a livello nazionale in quanto permette una movimentazione sia sul terreno del bosco sia su percorsi secondari.

Mentre il mezzo da utilizzare per trasportare il legname dall'imposto al luogo di utilizzo (abitazione) è in funzione della distanza percorsa (Bonoli, 2007). Pertanto se si assume una distanza media di 30 km su strada dovrà essere coperta mediante autocarro con pianale ribaltabile da 20-28 t, con carico di ritorno a vuoto.

8.2.3 Potenza della stufa

In base a quanto riportato in letteratura (European Commission, 2009 [34;35]), una stufa innovativa comunemente presenta una potenza nominale in uscita di 15 kW, pertanto il processo del SimaPro è stato modellato assegnando un valore di potenza in uscita compresa tra i 10 e i 20 kW. Questo range permette di allargare il sistema studiato anche a stufe che abbiano potenza leggermente superiori od inferiore.

8.2.4 Efficienza ed emissioni

Secondo quanto riportato in letteratura (European Commission, 2009 [34;35]) una stufa innovativa alimentata a legna, con tempo di vita di 35 anni, presenta un'efficienza media del 60%, contro il 47% di una comune stufa tradizionale, pertanto si è modellato il processo e di conseguenza le emissioni in funzione di tale parametro.

8.2.5 Percentuale di ceneri e loro trattamento

Il quantitativo di ceneri influenza principalmente la loro fase di smaltimento, la quale può presentare o meno impatti sull'ambiente. La percentuale di ceneri prodotta dipende sia dalla tecnologia utilizzata sia dal combustibile impiegato. Nel nostro caso varie tipologie di legname hanno quantitativi differenti, pertanto per una valutazione oggettiva e sommaria dei possibili impatti sono state seguite le linee guida riportate nel documento *BIOCEN-Gestione e valorizzazione delle ceneri di combustione nella filiera Legno-Energia Regione Lombardia*, redatto dal Comitato Termotecnico Italiano e Regione Lombardia nel 2004. In esso si esplicita chiaramente che per una prova di massima, riguardo alle ceneri, si può assumere una percentuale attorno al 3% della massa iniziale di legna. Ovviamente ciò non toglie che maggiori approfondimenti possano indicarne un quantitativo più vicino alla realtà. Per quanto riguarda il destino finale delle ceneri sono stati ipotizzati due scenari: il primo in cui il 50% venga incenerito ed il restante 50% sparso nei campi; mentre nel secondo scenario tutto il quantitativo prodotto sarà inviato all'inceneritore. I motivi che hanno condotto a tale confronto ed i risultati vengono riportati nel paragrafo Interpretazione dei danni-Analisi di contributo.

8.2.6 Possibilità di sfruttare sfalci da potature

Negli ultimi tempi si sta consolidando una nuova risorsa, quella derivante da sfalci di potature e ramaglie. In particolare tale opportunità sta emergendo grazie ad un incremento della sensibilità ambientale, che sta investendo le amministrazioni comunali. Di fatti la tendenza è rivolta al raggiungimento di una nuova filiera *città legno energia* in cui si privilegia il recupero, ovvero si dà la possibilità al verde urbano, derivante dalla periodica manutenzione, di avere un nuovo impiego elargendo i suoi effetti positivi anche al termine del ciclo di vita. Ovviamente per riuscire a modellare un corretto scenario in cui si vada a sostituire il combustibile legna, da approvvigionamento locale, con altro materiale di “scarto” a chilometri zero sarà indispensabile un quadro legislativo di riferimento.

Ad ora la classificazione di questi sfalci da potatura non è ben chiara, di fatti nella parte IV, del D.lgs. 152/2006, l'articolo 184 comma 2, che si riferisce alla *classificazione dei rifiuti urbani*, include anche *i rifiuti vegetali provenienti da aree verdi, quali giardini, parchi e aree cimiteriali*. Nel 2010 sono state introdotte due norme (*n. 129 e la n. 205*) che recano misure urgenti in materia di energia e disposizioni per le energie rinnovabili modificano in parte il D.lgs. 152/2006. L'elenco dei rifiuti urbani non subisce alcuna modifica, ma vengono date delle linee guida per poter classificare tali sfalci come sottoprodotto. Ovviamente, **qualora non siano soddisfatti tutti i requisiti, i materiali vegetali provenienti da sfalci e potature di manutenzione del verde pubblico e privato non rientrano nella definizione di “sottoprodotto” ma si devono classificare a pieno titolo come rifiuti**. Queste considerazioni giuridiche non possono essere generalizzate, ma si dovrà procedere con una verifica accurata caso per caso dello scenario a cui ci si trova di fronte, altrimenti si rischia di cadere in errore. Risulta azzardato, infatti, per produttori e detentori classificare a priori gli sfalci come sottoprodotti, senza legarli ad un precisa filiera o contesto di riferimento. Anche nell'articolo *La filiera città-legno-energia Nuove forme di gestione ecosostenibile del verde urbano* (Colucci et al., 2010), gli autori propongono che venga incentivato un simile sistema, in grado di chiudere il ciclo e portare dei benefici ai consumatori. Come riportato nel lavoro i fini ultimi a cui possono sottostare questi sfalci sono molteplici, dal compostaggio alla produzione di pannelli, dal cippato alla legna da ardere. In Italia, secondo i dati ISPRA, nel quadriennio 2003-2007 vi è stata una diminuzione del 6,7% degli sfalci smaltiti in discarica, mentre la frazione di essi destinata all'utilizzo come fonte di energia è aumentata dallo 0,1 allo 0,4%. Questa netta differenza è dovuta all'elevata percentuale di sfalci e ramaglie che attualmente vengono recuperati mediante il processo di compostaggio. In questo modo vengono valorizzati e possono essere gestiti come sottoprodotti e non più come rifiuti, poiché

hanno un utilizzo ben definito ed un valore economico, dettato dalle esigenze di mercato. Non è da escludere però che alcuni Comuni meno attrezzati non predispongano piani per il compostaggio, o non siano in grado di trattare rifiuti verdi. In questo caso gli sfalci e le ramaglie non si potrebbero più classificare come sottoprodotti, poiché necessariamente dovrebbero essere catalogati come veri e propri rifiuti. In quanto tali e conoscendo lo stato dell'arte delle tecnologie italiane, probabilmente il metodo che verrebbe impiegato per il loro smaltimento sarebbe il conferimento in discariche controllate. Tale soluzione risulta ormai ampiamente superata, poiché comporta impatti rilevanti sull'ambiente e sulla salute umana.

Di seguito viene rappresentato un grafico che mostra il contributo percentuale dei singoli processi sul totale.

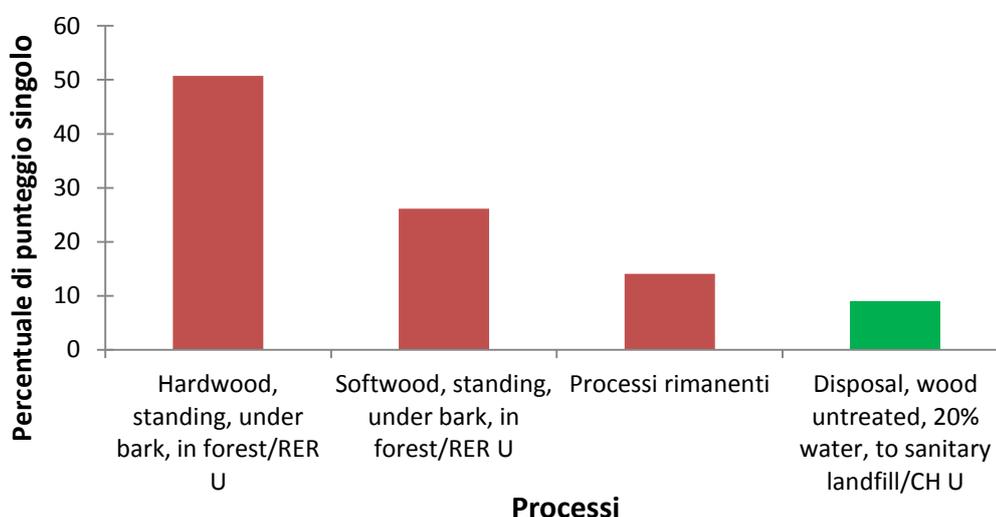


Figura 40 Punteggio percentuale dei processi sul totale

Come mostra l'ultima colonna, colorata in verde, gli impatti associati al conferimento in discarica di tali sfalci si aggirano attorno al 10% del totale. Per questo motivo, probabilmente, nel caso in cui la valorizzazione attraverso compostaggio non fosse possibile, sarebbe preferibile sfruttare questo "rifiuto" per uno scopo più nobile. Ad esempio per la produzione di energia termica. Ovvero si potrebbe ipotizzare uno scenario alternativo nel quale essi vengano rivenduti alla popolazione locale, per essere sfruttati come combustibile dedicato al riscaldamento domestico. Ovviamente per far ciò è necessario prendere le opportune precauzioni, in modo da evitare che l'impiego come combustibile risulti svantaggioso. Prima fra tutte è la distanza tra l'approvvigionamento e l'impianto di produzione di energia, nel nostro caso le abitazioni, che non dovrebbe superare i 40 km affinché vi possa essere convenienza economica (Colucci et al., 2010). Altro aspetto, forse più importante, sono le caratteristiche chimico fisiche del combustibile, come il contenuto di umidità e la densità, che

influiscono pesantemente sul P.C.I. (potere calorifico inferiore), parametro fondamentale per valutare l'energia sprigionata da 1 kg di combustibile. Normalmente le falciature sono caratterizzate da legna relativamente “fresca” avente un elevato tenore di umidità percentuale e di conseguenza un più basso potere calorifico inferiore.

Condizioni del legno	Tenore idrico	Potere calorifico
Fresco di taglio	50-60%	2,0 kWh/kg
Essiccato per un'estate	25-35%	3,4 kWh/kg
Essiccato per più anni	15-25%	4,0 kWh/kg

Tabella 14 Tenore idrico e potere calorifico di differenti tipologie di legname [62]

In prima approssimazione abbiamo considerato che il PCI del *legno fresco di taglio* risulti la metà rispetto a quello della *legna essiccata per più anni*, pertanto, nel caso in cui si decidesse di riscaldare un'abitazione esclusivamente con sfalci di potatura, probabilmente il quantitativo in tonnellate/anno raddoppierebbe passando da 2,76 a 5,52 t. Questo dato di certo provocherebbe ulteriori impatti sul consumo di territorio adibito alla coltivazione di legname, in più un incremento di combustibile si tradurrebbe in un aumento nelle emissioni, pertanto avendo sotto mano questi dati è opportuno valutarne caso per caso la fattibilità.

8.3 Modellazione Scenario di Riscaldamento domestico con stufa a pellet

8.3.1 Combustibile

8.3.1.1 Composizione e caratteristiche chimico fisiche

Come accennato nella sezione generale, il pellet a cui facciamo riferimento è esclusivamente quello da legno. In particolare il processo è stato modellato ipotizzando che la materia prima utile per la fase di pellettizzazione siano esclusivamente scarti, come segatura, corteccia e trucioli e non legno vergine. In questo modo la *filiere di produzione del pellet* descritta nel paragrafo 3.3.2 si riduce alle ultime due fasi, se si ipotizza che le segherie o altre attività produttrici di residui effettuino la pellettizzazione in loco. Questa assunzione è confermata dal documento *Development and promotion of a transparent European Pellets Market Creation of a European real-time Pellets Atlas* pubblicato da Pelletsatlas nel 2009. Di fatti secondo gli autori risulta che il pellet in Italia venga prodotto prevalentemente con scarti di segheria (>90%). In questo caso, in riferimento con quanto riportato nella direttiva UNI EN 14961-2, parleremo di pellet di classe B. La nostra attenzione si è soffermata su tale tipologia di materia prima per garantire il rispetto del concetto di *sistema integrato*, poiché in questo modo il rifiuto di un'attività diverrà materia prima per la produzione di un altro bene. Abbiamo ipotizzato che il materiale legnoso di partenza per la preparazione del pellet sia in gran parte

costituito da softwood ($\approx 72\%$) e la parte restante da hardwood ($\approx 28\%$). Tale assunzione è stata confermata dal documento *Manuale italiano per la combustione di pellet da legno* pubblicato da Pelletsatlas nel 2009. In esso si trova riscontro delle ipotesi qui compiute, poiché è esplicitato che per garantire un quantitativo omogeneo di lignina, sostanza che lega insieme il pellet, è necessario utilizzare un mix di legname. La soluzione migliore è quella di utilizzare una percentuale maggiore di softwood (tra il 70 e il 95%), poiché più ricco di tale sostanza, mentre il restante composto da hardwood.

Come per la legna così anche per il pellet è importante individuare i parametri che ne caratterizzano la fase di combustione, tra questi:

- PCI di 17 MJ/kg
- umidità del 10%
- densità di 715 kg/m³

I valori sono quelli di default presenti nel processo modellato dalla SimaPro, che sono da ritenersi validi poiché confermati dalle tabelle tecniche presenti nella UNI EN 14961-2. Per una visione della tabella si rimanda al paragrafo 3.3.3 della Parte Generale.

8.3.1.2 Approvvigionamento

Anche in questo caso, in accordo con quanto previsto dall'analisi dell'intero ciclo di vita, il processo di produzione di calore utilizzando la stufa a pellet include tutti i flussi di materiali ed energia e i processi associati alla fase di ottenimento della materia prima e trasformazione in combustibile. Per maggiori dettagli vedere il paragrafo *Filiera di produzione del pellet*

8.3.2 Trasporto

Da fonti di letteratura (Cocchi et al., 2009) risulta che i produttori di pellet in Italia sono circa un centinaio, distribuiti prevalentemente al Nord. Tale dato confermato anche da Vivarelli e Ghezzi, 2009 secondo il quale in Italia risultano operativi 86 impianti, di cui 8 in Lombardia, la maggior parte dei quali sono di piccole (< 30.000 t/y) e medie dimensioni (< 70.000 t/y).

Per quanto riguarda i produttori:

- 85-90% della produzione è venduto in sacchi da 15 kg
- 50% vende il prodotto ai negozi
- 30% vende il prodotto direttamente come venditore
- Il restante 20% non ha risposto.

Per la modellazione si è ipotizzato che gli 8 impianti siano distribuiti omogeneamente sul territorio e che siano in grado di soddisfare il fabbisogno di pellet in Lombardia, poiché se tutti fossero di piccole dimensioni la produzione potrebbe arrivare a 240.000 t/anno, di molto superiore a quello che è stato il consumo nel 2008 (121.621 t secondo quanto riportato da Pastorello e Dilara, 2008). Ciascun produttore coprirà un'area approssimativa di circa 30 km di raggio (Estensione Lombardia = 23.863 km²). Come si nota dall'elenco sovrastante la realtà più diffusa è la vendita con sacco; ciò nonostante è stato ipotizzato che il pellet venga distribuito direttamente ai consumatori mediante un camion ribaltabile da 20-28 t. Tale assunzione è stata effettuata poiché indubbiamente è il metodo più comodo; inoltre, caricando il combustibile su un mezzo la sua movimentazione è minore, ciò permette di diminuirne l'usura (Hansen et al., 2009).

8.3.2.1 Verifica incidenza del trasporto

Da molte fonti di letteratura (Cocchi et al., 2009; Junginger et al., 2010) si evince che il 75% della materia prima (costituita principalmente da scarti di segheria) è prodotto in Italia, mentre il restante 25% viene importato: via terra da Austria, Germania e Slovenia, attraverso camion da 20-28 t, e via mare da Spagna e Portogallo. Pertanto, in linea con i principi di un'analisi LCA, ci siamo posti la questione di quanto potesse incidere il trasporto sugli impatti totali. Per rispondere a tale quesito è stato necessario eseguire una verifica mediante l'utilizzo del software, che ha permesso di ottenere informazioni su quale sia l'incidenza della distanza sul totale. Per semplicità è stato ipotizzato che il pellet venga importato esclusivamente da Paesi limitrofi ai confini Nazionali, quindi raggiungibili via terra, e sono state poste delle distanze immaginarie, ma proporzionali tra loro: 30 km, 230 km, 430 km e 830 km.

Dal confronto riportato in Figura 41 si nota come la variazione della distanza incida in maniera proporzionale su alcuni fattori d'impatto, pertanto incrementando ulteriormente la distanza di approvvigionamento del pellet si prevede un aumento degli impatti. In particolare, risulta che l'impatto complessivo venga maggiorato del 15% circa con un aumento della distanza di 400 km, mentre nel caso in cui la distanza produttori-distributori fosse di 800 km l'impatto aumenterebbe del 30% circa. Ciò dovrebbe far riflettere i venditori ed acquirenti di pellet sulla sostenibilità del combustibile, che se prodotto lontano dal luogo di vendita si abbassa notevolmente.

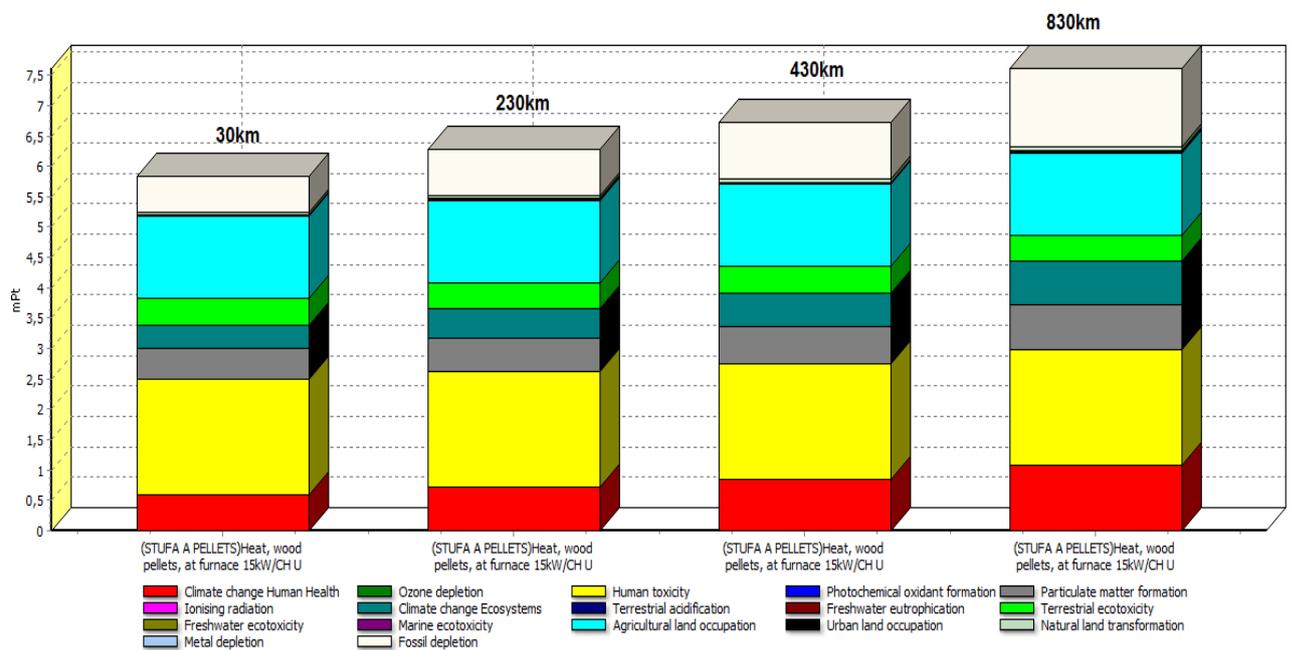


Figura 41 Variazione degli impatti in relazione all'incremento della distanza (fonte: SimaPro)

8.3.3 Potenza della stufa

Anche in questo caso il documento di riferimento per la modellazione della potenza della tecnologia è il *Lot 15- Solid fuel small combustions installations- Task 5: Base Cases*, European Commission DG TREN. In esso si indica che la potenza in uscita per una stufa a pellet deve essere attorno a 7kW, mentre nel processo da default si ha una potenza di 15 kW che come si evince dalla descrizione è mediata, poiché è applicabile a strumenti che hanno un range di potenza compreso tra i 10 e i 20kW. Ulteriori informazioni si ottengono da molti siti internet. Tra questi ve ne sono alcuni completamente dedicati alla tecnologia del pellet, tra cui: http://www.infopellet.it/calcolo_potenza_termica_stufe_caminetti_pellet.htm. In esso si trovano informazioni utili per calcolare il fabbisogno energetico di un'abitazione, che dipende

sia dalle dimensioni della casa sia dalla sua coibentazione. Ciò è possibile utilizzando un coefficiente moltiplicatore che può variare da 0,040 a 0,060 per metro cubo; tale valore si riferisce all'efficienza energetica della casa, più è alto minore sarà la coibentazione.

Quanto detto si traduce nella seguente assunzione: secondo ISTAT 2004 la “superficie media abitazioni” in Lombardia nel 2001 era di 94 m², aumentata di circa 1m² dal 1991, pertanto si può presumere che al 2011 essa sia di 95m². I fabbisogni energetici/anno, da D.P.R. 412/93, per zona climatica E (Lombardia) risultano:

3230 kWh/anno (min) 11020 kWh/anno (max) 7125kWh/anno (medio)

ipotizzando di avere un'altezza media dell'appartamento di 2,50 m e un fattore moltiplicatore medio di 0,05 si avrà:

$$\text{Volume} = 2,50\text{m} \cdot 95\text{m}^2 = 237,5\text{m}^3$$

$$\text{Potenza necessaria} = 237,5\text{m}^3 \cdot 0,05 = 11,87\text{kW} = 10210,60\text{kcal/h}$$

Tale potenza è in grado di sopperire ai fabbisogni energetici medi; ciò sta a significare che una stufa da 7kW potrebbe essere sufficiente per una superficie molto più piccola, pertanto troviamo conferma nelle assunzioni fatte e manteniamo una potenza compresa tra i 10 e i 20kW.

8.3.4 Efficienza ed emissioni

Da fonti di letteratura una stufa alimentata a pellet, con tempo di vita medio di 12,5 anni (European Commission, 2009[34;35]) presenta un'efficienza media del 64%. Anche in questo caso, come per lo scenario precedente, il quantitativo di combustibile e le emissioni sono state modellate in funzione di tale dato.

8.3.5 Percentuale di ceneri e loro trattamento

È stato ipotizzato che la combustione del pellet produca un quantitativo di ceneri leggermente inferiori rispetto alla legna, pertanto è stato scelto come valore il 2% del peso totale. Tale assunzione è stata confermata da quanto riportato nel documento *Handbook for the Certification of Wood Pellets for Heating Purpose* Based on EN 14961-2, redatto dall'European Pellet Council nel Febbraio 2011. In tale report si esplicita che per il pellet di classe B, ovvero prodotto a partire da scarti, come segatura e corteccia, il quantitativo di ceneri debba essere obbligatoriamente $\leq 3,0\%$.

9. ANALISI DI INVENTARIO, MODELLAZIONE SCENARI DI RISCALDAMENTO ALTERNATIVI

Differentemente da quanto fatto in precedenza, in questo paragrafo non vengono presentate delle vere e proprie modellazioni, piuttosto un insieme di indagini effettuate in letteratura per individuare quali sono le *BAT* attualmente presenti sul mercato italiano e allo stesso tempo confermare e/o correggere i dati presenti nei processi da default. Questo approccio differente rispetto a quanto avvenuto per il riscaldamento a biomassa è dovuto al ruolo secondario che i processi alternativi rivestono nello studio: l'allargamento dei confini di sistema è stato pensato solo a scopo qualitativo e non per dare informazioni quantitative in merito. Pertanto in questa parte del lavoro sono stati trascurati gli approfondimenti in merito a tutti i processi considerati marginali per le finalità dello studio, impiegando per la loro modellazione esclusivamente le informazioni già contenute nei processi di default. Un esempio potrebbe essere quello relativo ai processi di *trasporto*, che differentemente agli scenari precedenti, non sono rilevanti per ottenere dei confronti qualitativi.

9.1 Scenario di riscaldamento domestico mediante boiler a gas

Le caldaie esistenti vengono classificate in funzione delle loro prestazioni in standard e a condensazione. Attualmente quest'ultime rappresentano lo strumento più innovativo ed ecologico presente nel mercato italiano ed europeo (Kemma et al., 2005), poiché riescono ad ottenere rendimenti molto elevati grazie al recupero del calore latente di condensazione del vapore acqueo contenuto nei fumi, oltre a ridurre le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e monossido di carbonio (CO), circa il 70% in meno rispetto agli impianti tradizionali (direttiva 92/42/CEE). Pertanto il processo utilizzato come scenario di confronto dei metodi a biomassa risulta quello che vede come tecnologia una caldaia a condensazione, avente le caratteristiche di idoneità per poter essere installata in abitazioni. Secondo la direttiva 92/42/CEE (del 21 Maggio 1992) con il termine caldaia da installare in un ambiente abitato si intende una caldaia con potenza nominale utile inferiore a 37 kW progettata per riscaldare, mediante il calore emesso dall'involucro, l'ambiente abitato in cui è installata. Deve essere provvista di vaso di espansione aperto che provvede all'alimentazione con acqua calda mediante circolazione naturale per gravità; sull'involucro di questa caldaia è menzionato esplicitamente che deve essere installata in un ambiente abitato. La potenza nominale utile, parametro più importante per valutare le performance del boiler, viene espressa in chilowatt e definita come la potenza termica massima fissata, potenza che può essere mantenuta in regime di funzionamento continuo. Per ottenere informazioni e conferma di quanto riportato nel processo presente

come default nel SimaPro, sono stati visionati alcuni documenti tra cui *Methodology Study Eco-design of Energy-using Products, Final Report- Gas & Oil-fired CH boilers (2005)* e le schede tecniche delle caldaie Beretta, traendo come conclusione che i boiler utilizzati nelle single abitazioni lavorano in media con una potenza minima di circa 10 kW.

Il tempo di vita medio in Europa, secondo lo studio *Methodology Study Eco-design of Energy-using Products, Final Report- Gas & Oil-fired CH boilers (2005)* è all'incirca di 17 anni, con una sostituzione nel tempo di comparti che rappresentano una percentuale compresa tra 1-2% del peso totale (MilleuMaten 1993). Mentre per quanto riguarda il fine vita delle caldaie le parti metalliche, quali ferro ed acciaio, non hanno problemi di riciclaggio, le plastiche, contenute nell'involucro e nei controlli elettronici, sono circa il 5% del peso totale e non possono attualmente essere riciclate, ma finiscono in discarica e all'inceneritore (MilleuMaten 1993). Queste informazioni confermano le scelte metodologiche fatte nella modellazione del processo di default.

9.2 Scenario di riscaldamento domestico mediante pannello solare termico

Attualmente la tecnologia presente sul mercato più installata e che presenta prestazioni migliori risulta indubbiamente il pannello solare termico con collettore piano vetrato a circolazione forzata (Ardente et al., 2005[4;5]; ENEA, 2009; Pauschinger et al., 2003), che sfrutta come sistema ausiliario di riscaldamento un boiler a gas. In questo modo si riesce a raggiungere la temperatura voluta anche nei periodi invernali, nei quali sicuramente il solo solare termico risulterebbe non sufficiente. Pertanto è stato scelto come processo di riferimento quello che presentava tali caratteristiche, in più, ipotizzando che il riscaldamento venga effettuato in un'abitazione media lombarda (di 95m² e 3-4 persone), si ottiene conferma di quanto riportato nel processo di default da fonti di letteratura (Goedkoop et al. 2008; ICARO, 2008):

- collettore piano vetrato di circa 12 m²;
- serbatoio di accumulo di acqua di circa 2000 l;
- pompa con potenza di 40 W

Secondo lo studio *Life cycle assessment of solar thermal collector*, pubblicato nel 2005 da F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura e V. Lo Brano, il tempo di vita di un impianto solare termico, in assenza di fenomeni fisici rilevanti, è in media di 15 anni; durante i quali si prevedono 2 manutenzioni, per la sostituzione di alcuni componenti.

9.3 Scenario di riscaldamento domestico mediante pompa di calore

La tecnologia presente maggiormente sul mercato italiano è la **pompa di calore ad azionamento meccanico**, che permette di raggiungere la temperatura voluta utilizzando un compressore alimentato da energia elettrica. Per maggiori dettagli riguardo il funzionamento vedere il paragrafo di riferimento nella Parte Generale. Come confermato da molti documenti (Acerbi, 2009; Forsén, 2005) la tecnologia più diffusa negli Stati del sud Europa è quella aria-aria, poiché, oltre ad essere meno complicata, permette di affiancare il raffreddamento durante i mesi estivi. In Italia circa l'84% delle abitazioni che hanno installato una pompa di calore si è rivolto alla tecnologia aria-aria (Acerbi, 2009) e all'interno di questa tipologia lo schema più diffuso è indubbiamente quello a split (principalmente il *monosplit*). In questo caso non è stato possibile riferire lo scenario alla tecnica maggiormente diffusa nel mercato italiano, poiché nel database è presente esclusivamente il processo di riscaldamento domestico attraverso pompa di calore aria-acqua. Pertanto in prima approssimazione abbiamo ritenuto che il processo di *default* sia attendibile come scenario di confronto, ipotizzando che i carichi ambientale delle due tecniche siano paragonabili e di conseguenza entrambe attendibile.

9.4 Verifica incidenza della costruzione della tecnologia

Di seguito in Figura 42 è riportato l'impatto percentuale che l'assemblaggio delle tecnologie e le fasi di fine vita hanno sul totale.

1. Boiler a gas: in questo caso la costruzione e smaltimento del boiler incidono con una percentuale inferiore all'1% del totale, dato confermato da diversi studi di letteratura, tra cui *Baxi Wall Hung Condensing Boiler LUNA 4-EPD* (2009), *Methodology Study Eco-design of Energy-using Products, Final Report- Gas & Oil-fired CH boilers* (2005) e *LCA di caldaie a condensazione nell'ambito della direttiva EuP 2B* (2008).
2. Pompa di calore: l'impatto della costruzione e smaltimento di tale tecnologia si colloca perfettamente a metà tra le altre due.
3. Pannello solare termico: in questo caso si considera esclusivamente l'impatto associato alla costruzione del collettore, mentre viene escluso il sistema che fornisce riscaldamento ausiliario, altrimenti se fosse stato considerato il sistema integrato la percentuale sarebbe salita oltre il 99%.

Più le percentuali sono elevate, maggiore è l'impatto di costruzione e smaltimento sull'intero processo di riscaldamento domestico; ciò si traduce in un impatto minore sul

carico totale delle fasi di produzione di calore. Ad esempio, l'intera infrastruttura (costruzione e smaltimento) del solare termico incide per il 5% del totale perché parte dell'energia sfruttata per produrre calore deriva dal Sole e non da fonti esauribili ed inquinanti.

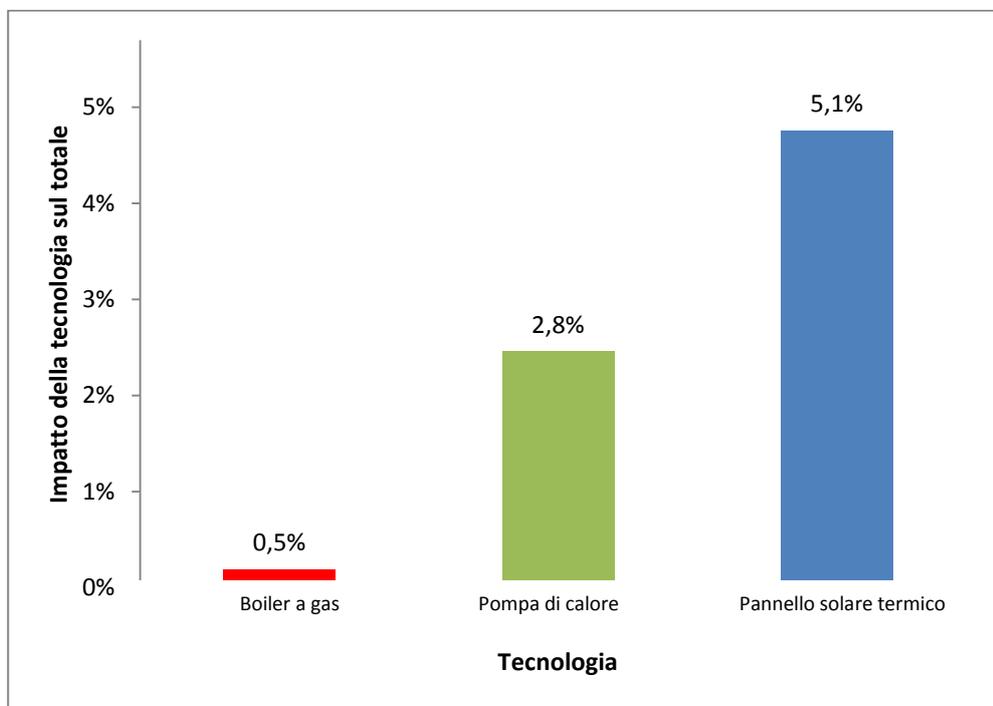


Figura 42 Incidenza della costruzione e smaltimento della tecnologia sul processo di riscaldamento domestico

10. QUALITÀ DEI DATI

Per garantire maggior trasparenza ed attendibilità del presente lavoro di Tesi, si è scelto un metodo per quantificare la qualità dei dati utilizzati. In particolare si fa riferimento alla “*quality pedigree matrix*” (Tabella 15), una matrice di assegnazione di qualità dei dati proposta da Lindfors (1995) e Weidema (1996). Per ogni dato raccolto la matrice fornisce indicazioni relative alla sua copertura temporale, geografica e tecnologica, oltre a riferimenti su concetti di precisione, completezza, rappresentatività, coerenza e riproducibilità. Per garantire tale risultato viene assegnato un punteggio da 1 a 5 a ciascun criterio considerato, in merito alla qualità raggiunta; la scala di attribuzione del punteggio indicatore è tale per cui “1” rappresenta la miglior qualità, mentre “5” quella peggiore.

	<i>Punteggio Indicatore</i>				
	1	2	3	4	5
<i>Metodo di acquisizione</i>	Dati misurati	Dati calcolati da misurazioni	Dati calcolati con approssimazioni	Dati stimati da esperti del settore	Dati approssimati non qualificati
<i>Indipendenza delle fonti dei dati</i>	Dati certi, fonti pubbliche e/o indipendenti	Dati acquisiti direttamente in impianto	Fonti indipendenti, ma basate su dati dell'impianto non verificati	Dati di impianti simili non verificati	Dati dell'impianto non verificati
<i>Rappresentatività</i>	Dati rappresentativi da un numero adeguato di campioni, ottenuti in un lungo periodo	Dati rappresentativi da un numero minore di campioni, ottenuti in un lungo periodo	Dati rappresentativi da un numero adeguato di campioni, ottenuti in un breve periodo	Dati da un numero adeguato di campioni, ottenuti in un breve periodo	Rappresentatività sconosciuta o incompleta di dati ottenuti in un breve periodo
<i>Correlazione Temporale</i>	Meno di 3 anni	Meno di 5 anni	Meno di 10 anni	Meno di 20 anni	Più di 20 anni, o di età sconosciuta
<i>Correlazione Geografica</i>	Dati provenienti dall'area di studio	Media di dati da aree diverse, compresa l'area di studio	Dati da aree con produzioni simili a quella di interesse (esclusa)	Dati da aree con produzioni approssimabili a quella di interesse	Dati da aree sconosciute o con produzioni diverse da quella di studio
<i>Correlazione Tecnologica</i>	Dati da impianti, processi e materiali sotto studio	Dati da processi e materiali in esame, ma da impianti simili	Dati da processi e materiali in esame, ma da impianti diversi	Dati da processi e/o materiali simili, ma da uguale tecnologia	Dati da processi e/o materiali simili, ma da tecnologia diversa

Tabella 15 Quality pedigree matrix (fonte: Lindfors, 1995; e Weidema, 1996)

Prendendo come base quanto accennato di seguito vengono riportati i punteggi indicatori per ciascuno scenario.

Tabella 16 Indicatori di punteggio di qualità dei dati per ciascun scenario

<i>Scenario</i> <i>Riscaldamento domestico Stufa a legna</i>	<i>Metodo di acquisizione</i>	<i>Indipendenza delle fonti dei dati</i>	<i>Rappresentatività</i>	<i>Correlazione Temporale</i>	<i>Correlazione Geografica</i>	<i>Correlazione Tecnologica</i>
Processi in input	3	3	2	3	1	2
Processi in output	3	3	2	1	1	1
Infrastruttura	4	3	2	3	1	1
Trasporto	3	3	2	2	2	1
<i>Scenario</i> <i>Riscaldamento domestico Stufa a pellet</i>	<i>Metodo di acquisizione</i>	<i>Indipendenza delle fonti dei dati</i>	<i>Rappresentatività</i>	<i>Correlazione Temporale</i>	<i>Correlazione Geografica</i>	<i>Correlazione Tecnologica</i>
Processi in input	3	3	2	3	1	2
Processi in output	3	3	2	1	1	1
Infrastruttura	4	3	2	3	1	1
Trasporto	3	3	2	2	2	1
<i>Scenario</i> <i>Riscaldamento domestico Boiler a gas</i>	<i>Metodo di acquisizione</i>	<i>Indipendenza delle fonti dei dati</i>	<i>Rappresentatività</i>	<i>Correlazione Temporale</i>	<i>Correlazione Geografica</i>	<i>Correlazione Tecnologica</i>
Processi in input	4	3	3	3	2	2
Processi in output	4	3	3	3	2	1
Infrastruttura	4	3	3	3	2	2
Trasporto	3	3	4	3	3	1
<i>Scenario</i> <i>Riscaldamento domestico Pannello solare termico</i>	<i>Metodo di acquisizione</i>	<i>Indipendenza delle fonti dei dati</i>	<i>Rappresentatività</i>	<i>Correlazione Temporale</i>	<i>Correlazione Geografica</i>	<i>Correlazione Tecnologica</i>
Processi in input	4	3	3	3	2	2
Processi in output	4	3	3	3	2	1
Infrastruttura	4	3	3	2	2	1
Trasporto	3	3	4	3	3	1
<i>Scenario</i> <i>Riscaldamento domestico Pompa di calore</i>	<i>Metodo di acquisizione</i>	<i>Indipendenza delle fonti dei dati</i>	<i>Rappresentatività</i>	<i>Correlazione Temporale</i>	<i>Correlazione Geografica</i>	<i>Correlazione Tecnologica</i>
Processi in input	4	3	3	3	3	1
Processi in output	4	3	3	3	3	1
Infrastruttura	4	3	3	3	2	2
Trasporto	3	3	4	3	3	1

Da una visione complessiva di quanto riportato sopra si nota che gli scenari di riscaldamento domestico a biomassa hanno una qualità dei dati maggiore rispetto agli altri, rispecchiando gli obiettivi del presente studio. Come si osserva dalle tabelle, durante la fase di modellazione

degli scenari, non si disponeva di dati primari per i processi di riscaldamento a biomassa. Questo costituisce inevitabilmente una limitazione dello studio, poiché questi dati ottenuti con misure dirette potevano essere impiegati per acquisire informazioni più rappresentative riguardo le caratteristiche delle emissioni, ciò nonostante non viene intaccata la validità e la significatività della ricerca, che è in grado di fornire ugualmente una visione oggettiva e critica delle problematiche indagate.

11. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI

La fase di *Life Cycle Impact Assessment* ha lo scopo di trasformare ogni flusso dell'analisi di inventario in un contributo all'impatto ambientale, visualizzando quelli che sono i rispettivi carichi su ogni singola categoria, di midpoint ed endpoint. Il meccanismo dei fattori di caratterizzazione è descritto in dettaglio nella Parte Generale.

Di seguito vengono riportate in primis le scelte metodologiche adottate, per poi focalizzare l'attenzione sulle valutazioni degli impatti per ogni singolo processo di riscaldamento domestico, mostrando in dettaglio i risultati ottenuti.

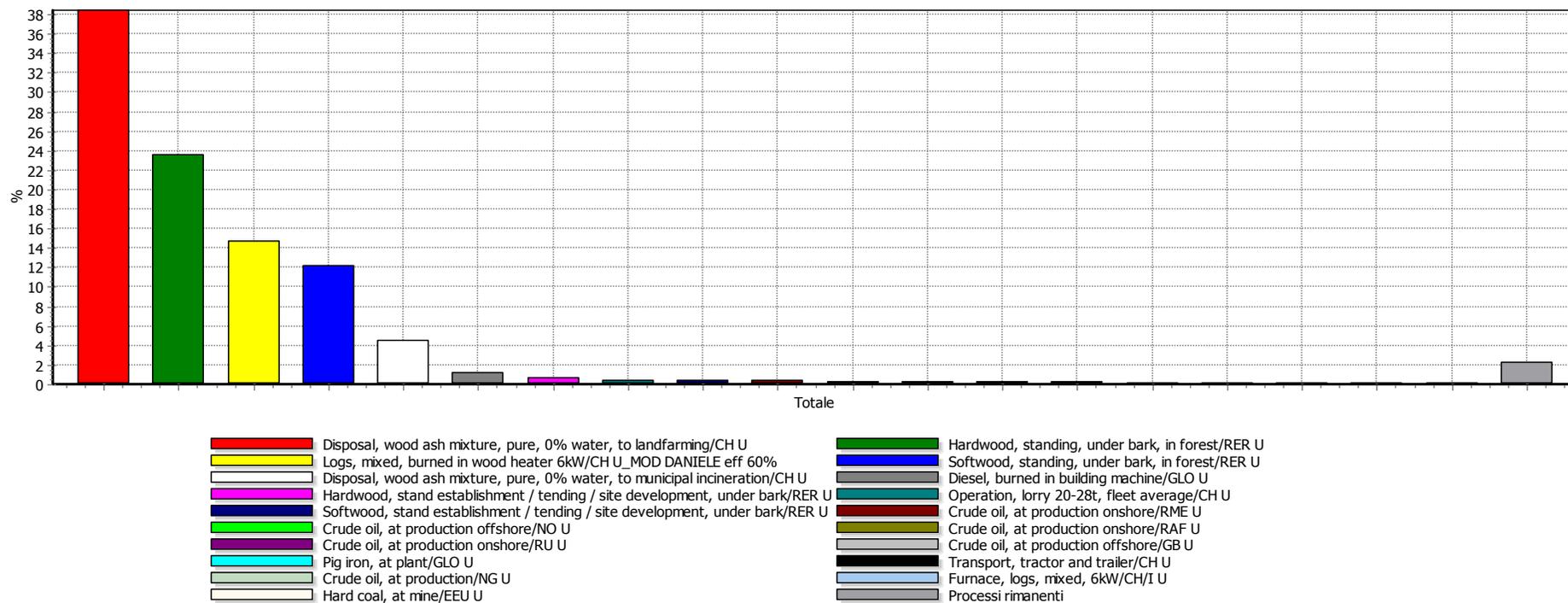
11.1 Categorie e metodo di valutazione degli impatti

Per lo studio di LCA in questione si è scelto di considerare tutte le categorie d'impatto a disposizione e per la valutazione degli impatti di utilizzare, come già accennato nella Parte Generale, il metodo di analisi ReCiPe 2008. Per maggiori dettagli riguardo tale metodo di valutazione si rimanda alla sezione *Il metodo ReCiPe 2008*. La scelta è ricaduta su questo metodo di analisi per due motivi principali: il metodo si propone come un miglioramento ed integrazione di due tra i metodi più impiegati e, inoltre, include categorie di impatto importanti per la scelta delle tecnologie analizzate, come un indicatore delle emissioni di particolato fine. Questo aspetto non viene considerato in un metodo maggiormente conosciuto come Ecoindicator99, mentre nel ReCiPe 2008 vi è una categoria midpoint "*Particulate matter formation*", che permette di tenere in considerazione tale fonte di inquinamento.

Inoltre per stimare il grado di soggettività dello studio si è deciso di affiancare al metodo in questione la classificazione di archetipi culturali prevista da Thompson, già descritto nella Parte Generale. In particolare la tipologia adottata nel lavoro di Tesi è la prospettiva Europe Hierarchist (H). Essa è stata scelta per due motivi: in primis ci si è rivolti alla fascia geografica Europa, così da avere maggiore rappresentatività della zona presa in considerazione nello studio (la Lombardia); in secondo luogo la nostra attenzione si è rivolta alla tipologia gerarchica, poiché, secondo quanto riportato nel documento *ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level* (2009), risulta una via di mezzo tra le tre. Di fatti mentre la tipologia Individualista (I) si basa su un lasso di tempo ristretto, comportando automaticamente un certo ottimismo di fondo, la Egalitarian (E) è la più precauzionale, considerando un lasso di tempo molto più elevato.

11.2 Analisi di contributo degli scenari di riscaldamento domestico a biomassa

Figura 43 Analisi di contributo dello scenario di riscaldamento domestico con stufa a legna innovativa

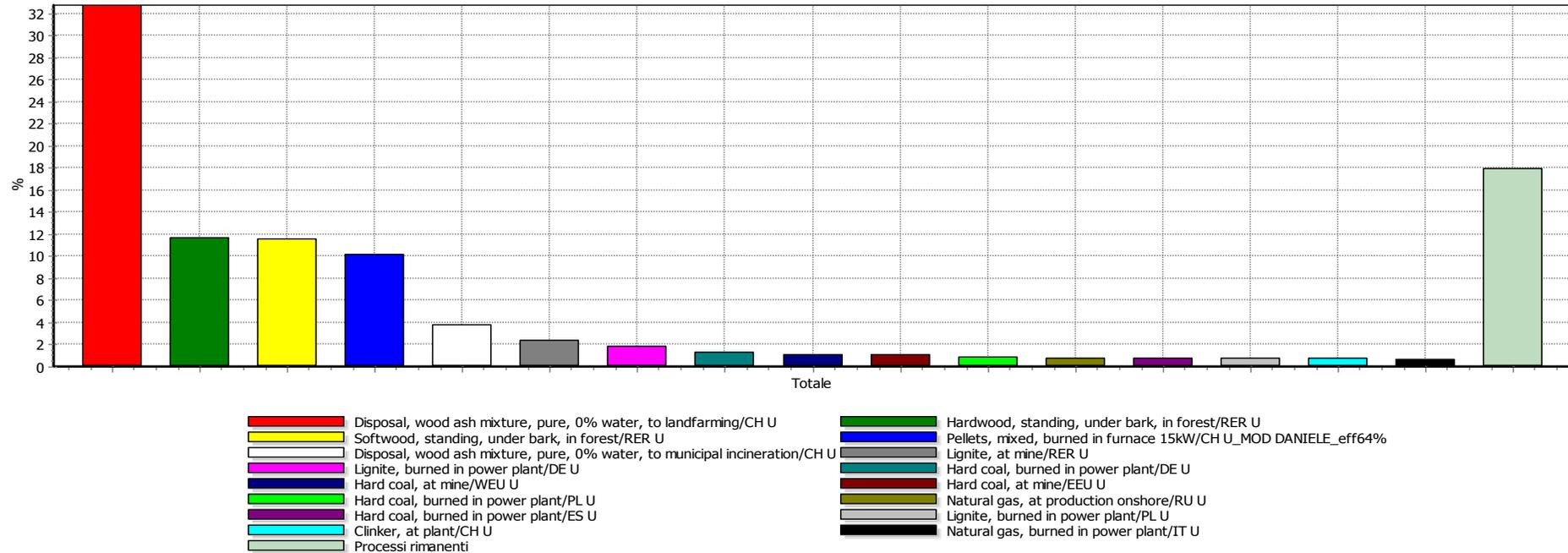


Analizzando 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_MOD DANIELE eff 60%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A / Punteggio singolo

Tabella 17 Scenario di riscaldamento domestico con stufa a legna innovativa : elenco processi (analisi di contributo)

	Processi	Contributo %
1	Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to landfarming/CH U	38,41
2	Hardwood, standing, under bark, in forest/RER U	23,61
3	Logs, mixed, burned in wood heater 6kW/CH U_ eff60%	14,74
4	Softwood, standing, under bark, in forest/RER U	12,17
5	Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/CH U	4,44
6	Processi rimanenti	2,19
7	Diesel, burned in building machine/GLO U	1,13
8	Hardwood, stand establishment / tending / site development, under bark/RER U	0,64
9	Operation, lorry 20-28t, fleet average/CH U	0,39
10	Softwood, stand establishment / tending / site development, under bark/RER U	0,37
11	Crude oil, at production onshore/RME U	0,34
12	Crude oil, at production offshore/NO U	0,25
13	Crude oil, at production onshore/RAF U	0,24
14	Crude oil, at production onshore/RU U	0,21
15	Crude oil, at production offshore/GB U	0,21
16	Pig iron, at plant/GLO U	0,16
17	Transport, tractor and trailer/CH U	0,14
18	Crude oil, at production/NG U	0,12
19	Furnace, logs, mixed, 6kW/CH/I U	0,12
20	Hard coal, at mine/EEU U	0,12

Figura 44 Analisi di contributo dello scenario di riscaldamento domestico con stufa a pellet



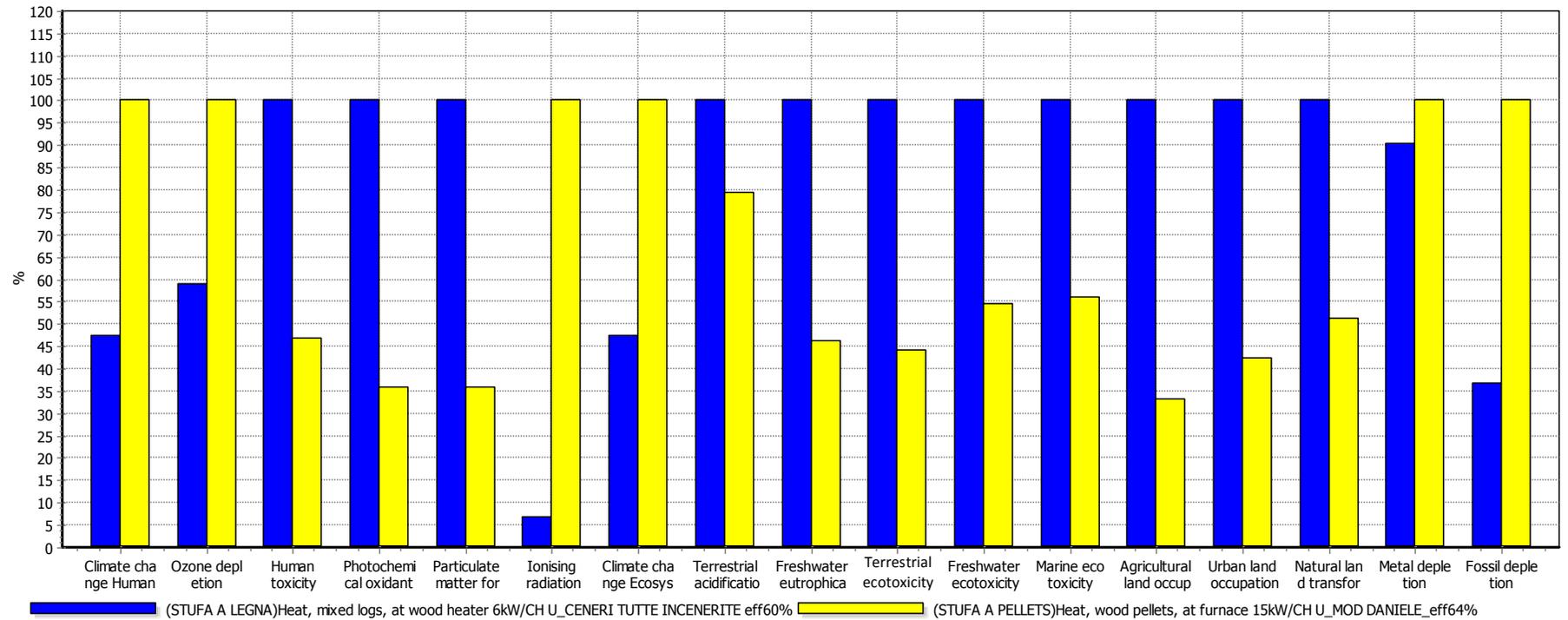
Analizzando 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A / Punteggio singolo

Tabella 18 Scenario di riscaldamento domestico con stufa a pellet : elenco processi (analisi di contributo)

	Processi	Contributo %
1	Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to landfarming/CH U	32,70
2	Processi rimanenti	15,12
3	Hardwood, standing, under bark, in forest/RER U	11,61
4	Softwood, standing, under bark, in forest/RER U	11,49
5	Pellets, mixed, burned in furnace 15kW/CH U_eff64%	10,13
6	Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/CH U	3,78
7	Lignite, at mine/RER U	2,43
8	Lignite, burned in power plant/DE U	1,80
9	Hard coal, burned in power plant/DE U	1,29
10	Hard coal, at mine/WEU U	1,10
11	Hard coal, at mine/EEU U	1,05
12	Hard coal, burned in power plant/PL U	0,91
13	Natural gas, at production onshore/RU U	0,78
14	Hard coal, burned in power plant/ES U	0,78
15	Lignite, burned in power plant/PL U	0,78
16	Clinker, at plant/CH U	0,74
17	Natural gas, burned in power plant/IT U	0,68
18	Lignite, burned in power plant/CZ U	0,59
19	Operation, lorry >16t, fleet average/RER U	0,59
20	Operation, lorry 20-28t, fleet average/CH U	0,58
21	Natural gas, at production onshore/DZ U	0,53
22	Crude oil, at production onshore/RME U	0,53

11.3 Valutazione del danno

Figura 45 Caratterizzazione: confronto scenario stufa a legna innovativa con stufa a pellet

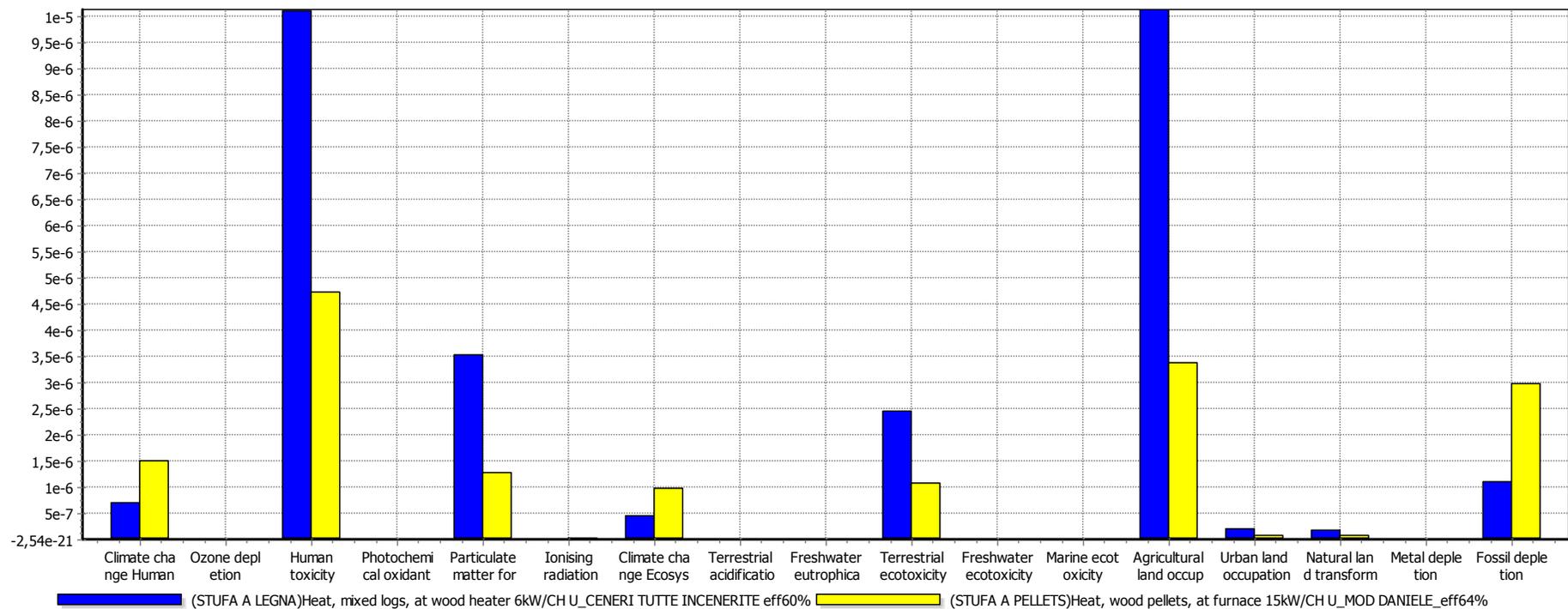


Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.0

Tabella 19 Caratterizzazione: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto midpoint	Unità	Stufa a Legna Innovativa	Stufa a Pellet
Climate change Human Health	DALY	1,43E-08	3,01E-08
Ozone depletion	DALY	1,84E-12	3,12E-12
Human toxicity	DALY	2,04E-07	9,55E-08
Photochemical oxidant formation	DALY	2,07E-11	7,42E-12
Particulate matter formation	DALY	7,11E-08	2,55E-08
Ionising radiation	DALY	1,83E-11	2,64E-10
Climate change Ecosystems	species.yr	8,07E-11	1,71E-10
Terrestrial acidification	species.yr	1,14E-12	9,00E-13
Freshwater eutrophication	species.yr	1,14E-12	5,28E-13
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	4,28E-10	1,88E-10
Freshwater ecotoxicity	species.yr	8,58E-14	4,68E-14
Marine ecotoxicity	species.yr	3,79E-16	2,12E-16
Agricultural land occupation	species.yr	1,77E-09	5,90E-10
Urban land occupation	species.yr	3,32E-11	1,41E-11
Natural land transformation	species.yr	2,93E-11	1,50E-11
Metal depletion	\$	1,03E-04	1,15E-04
Fossil depletion	\$	3,34E-02	9,12E-02

Figura 45 Normalizzazione: confronto scenario stufa a legna innovativa con stufa a pellet

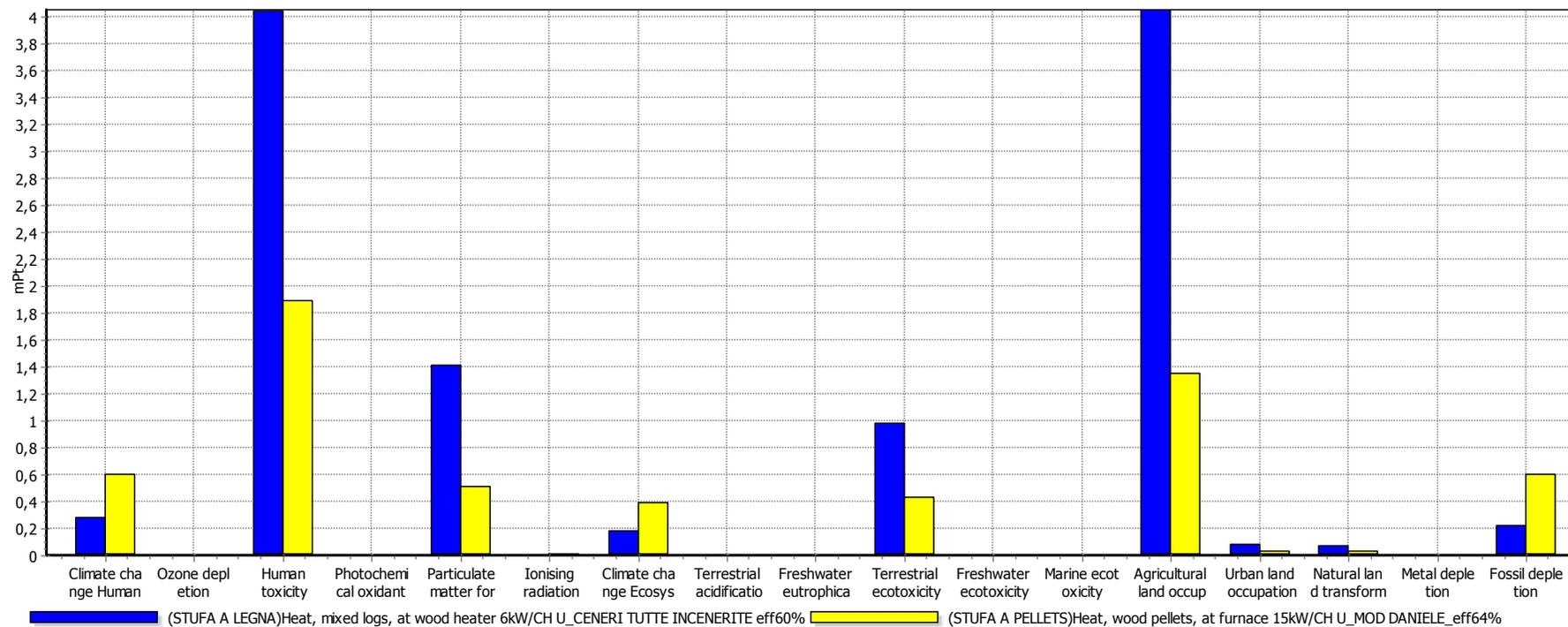


Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1

Tabella 20 Normalizzazione: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet
Climate change Human Health	-	7,06E-07	1,49E-06
Ozone depletion	-	9,09E-11	1,54E-10
Human toxicity	-	1,01E-05	4,73E-06
Photochemical oxidant formation	-	1,02E-09	3,67E-10
Particulate matter formation	-	3,52E-06	1,26E-06
Ionising radiation	-	9,03E-10	1,31E-08
Climate change Ecosystems	-	4,62E-07	9,76E-07
Terrestrial acidification	-	6,49E-09	5,15E-09
Freshwater eutrophication	-	6,54E-09	3,02E-09
Terrestrial ecotoxicity	-	2,45E-06	1,08E-06
Freshwater ecotoxicity	-	4,91E-10	2,68E-10
Marine ecotoxicity	-	2,17E-12	1,21E-12
Agricultural land occupation	-	1,01E-05	3,37E-06
Urban land occupation	-	1,90E-07	8,07E-08
Natural land transformation	-	1,68E-07	8,57E-08
Metal depletion	-	3,39E-09	3,75E-09
Fossil depletion	-	1,09E-06	2,98E-06

Figura 46 Pesatura: confronto scenario stufa a legna innovativa con stufa a pellet

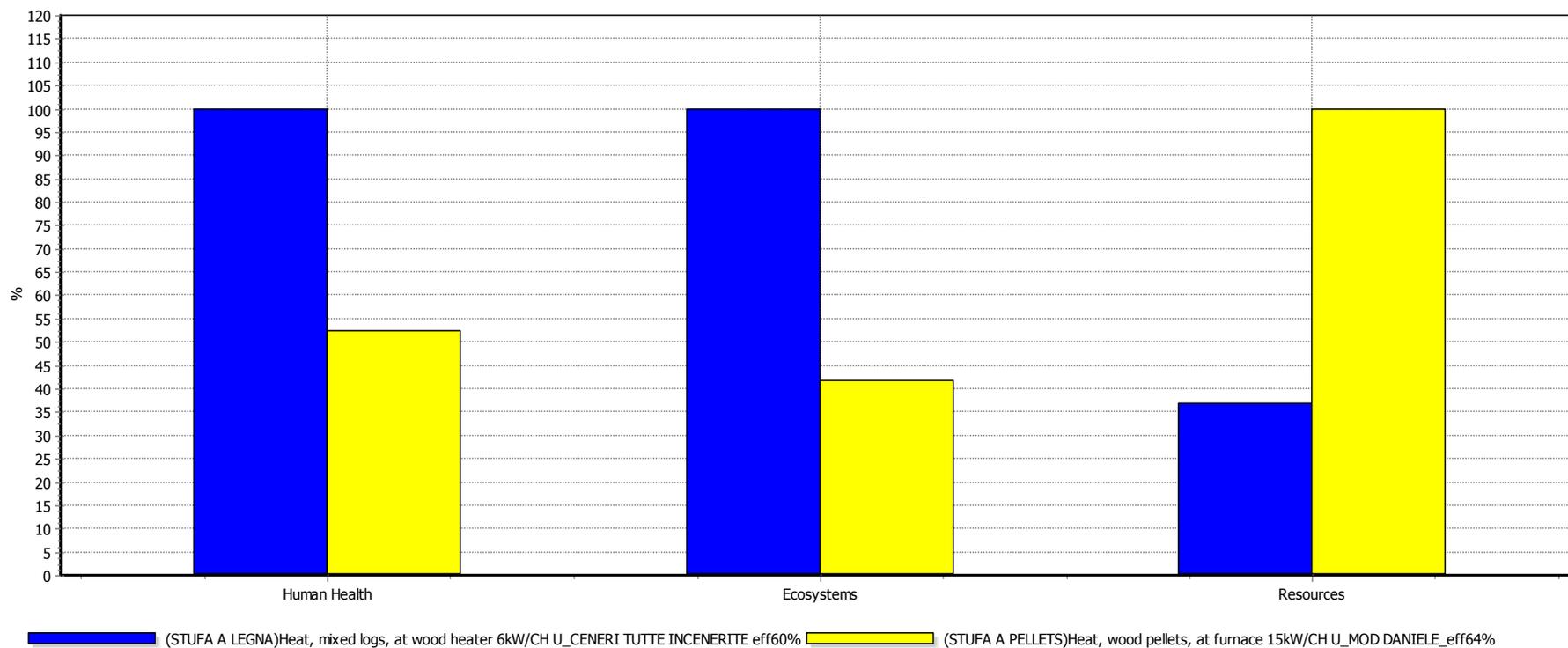


Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.

Tabella 21 Pesatura: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet
Climate change Human Health	Pt	2,82E-04	6,00E-04
Ozone depletion	Pt	3,64E-08	6,18E-08
Human toxicity	Pt	4,04E-03	1,90E-03
Photochemical oxidant formation	Pt	4,09E-07	1,47E-07
Particulate matter formation	Pt	1,41E-03	5,05E-04
Ionising radiation	Pt	3,61E-07	5,22E-06
Climate change Ecosystems	Pt	1,85E-04	3,90E-04
Terrestrial acidification	Pt	2,60E-06	2,06E-06
Freshwater eutrophication	Pt	2,62E-06	1,21E-06
Terrestrial ecotoxicity	Pt	1,00E-03	4,31E-04
Freshwater ecotoxicity	Pt	1,96E-07	1,07E-07
Marine ecotoxicity	Pt	8,67E-10	4,85E-10
Agricultural land occupation	Pt	4,05E-03	1,35E-03
Urban land occupation	Pt	7,59E-05	3,23E-05
Natural land transformation	Pt	6,70E-05	3,43E-05
Metal depletion	Pt	6,77E-07	7,49E-07
Fossil depletion	Pt	2,20E-04	5,96E-04

Figura 47 Valutazione dei danni: confronto scenario stufa a legna innovativa con stufa a pellet, categorie endpoint

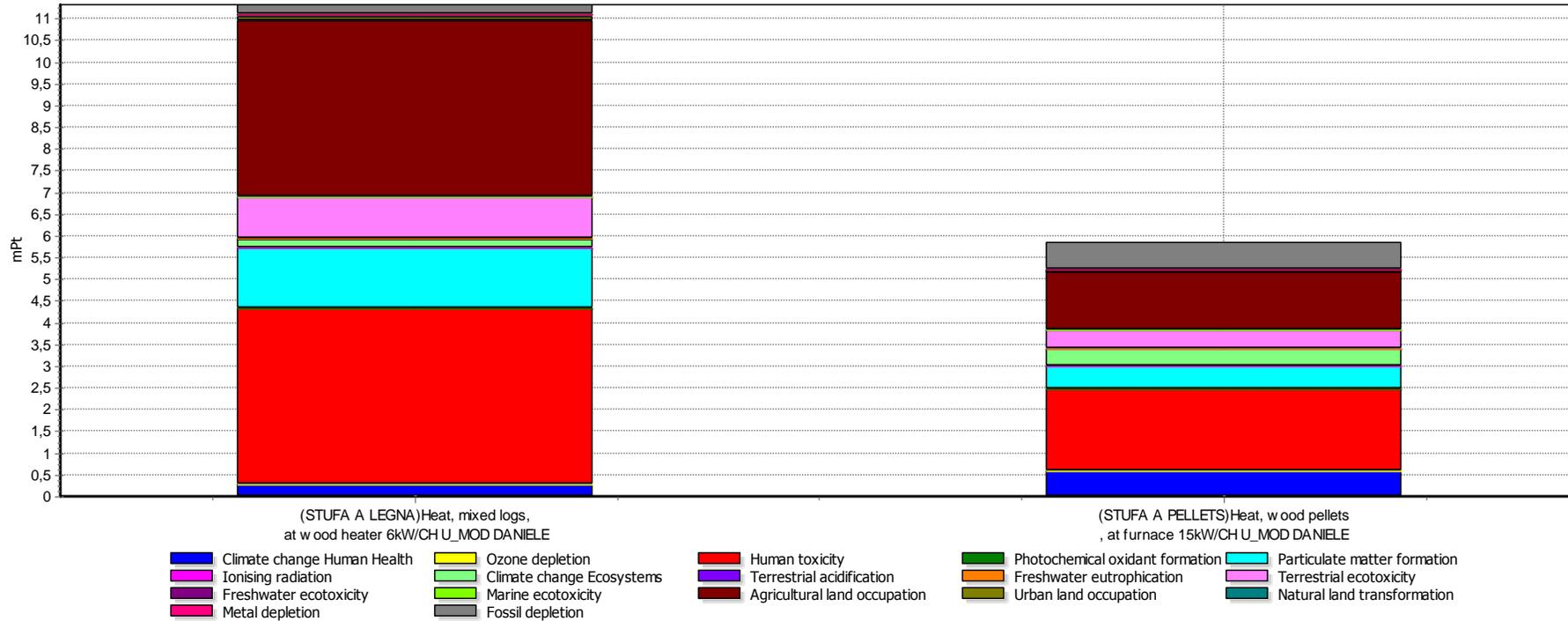


Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1

Tabella 22 Valutazione dei danni: impatto di ciascun scenario per ogni categoria endpoint

Categoria di danno	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet
Human Health	DALY	2,90E-07	1,51E-07
Ecosystems	species.yr	2,34E-09	9,79E-10
Resources	\$	0,033	0,09

Figura 48 Punteggio singolo: confronto scenario stufa a legna innovativa con stufa a pellet

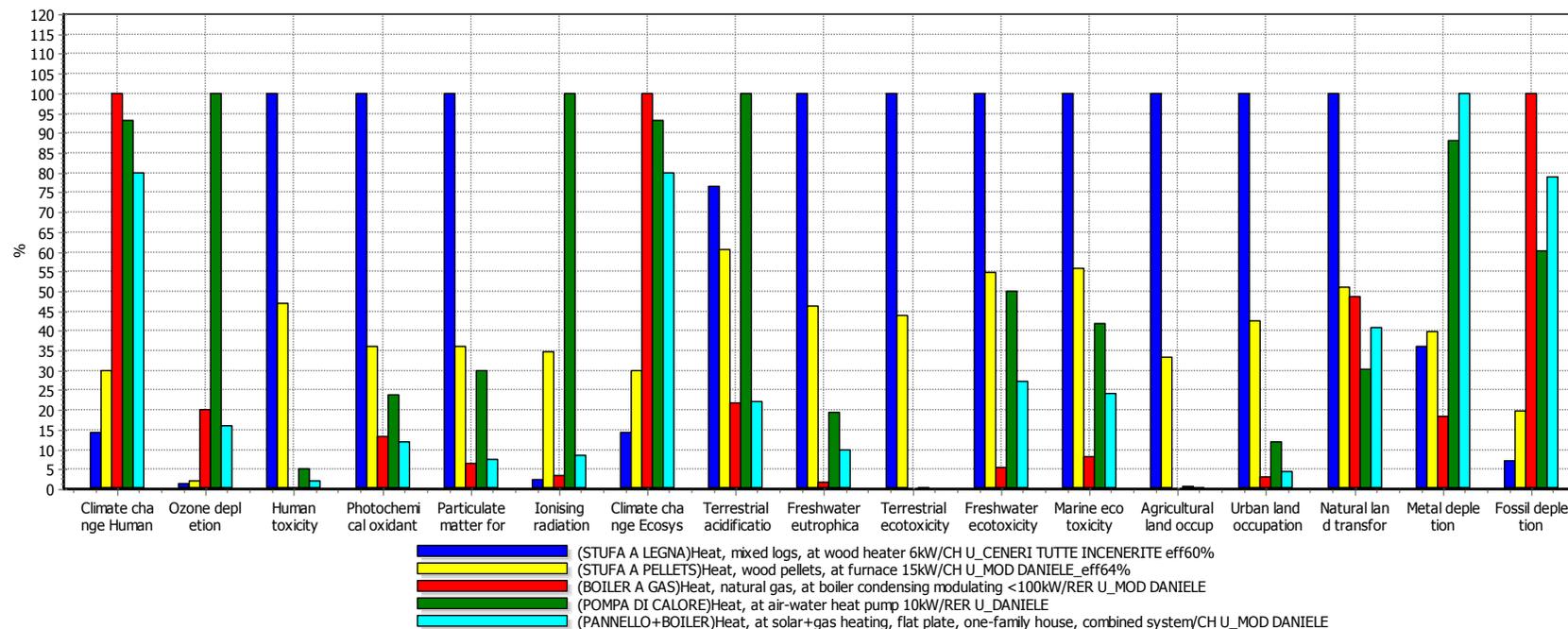


Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_MOD DANIELE eff 60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%'; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe

Tabella 23 Punteggio singolo: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet
Climate change Human Health	Pt	2,82E-04	5,97E-04
Ozone depletion	Pt	3,64E-08	6,18E-08
Human toxicity	Pt	4,04E-03	1,90E-03
Photochemical oxidant formation	Pt	4,09E-07	1,47E-07
Particulate matter formation	Pt	1,41E-03	5,05E-04
Ionising radiation	Pt	3,61E-07	5,22E-06
Climate change Ecosystems	Pt	1,85E-04	3,90E-04
Terrestrial acidification	Pt	2,60E-06	2,06E-06
Freshwater eutrophication	Pt	2,62E-06	1,21E-06
Terrestrial ecotoxicity	Pt	9,79E-04	4,31E-04
Freshwater ecotoxicity	Pt	1,96E-07	1,07E-07
Marine ecotoxicity	Pt	8,67E-10	4,85E-10
Agricultural land occupation	Pt	4,05E-03	1,35E-03
Urban land occupation	Pt	7,59E-05	3,23E-05
Natural land transformation	Pt	6,70E-05	3,43E-05
Metal depletion	Pt	6,77E-07	7,49E-07
Fossil depletion	Pt	2,18E-04	5,96E-04

Figura 49 Caratterizzazione: confronto dei cinque scenari di riscaldamento domestico

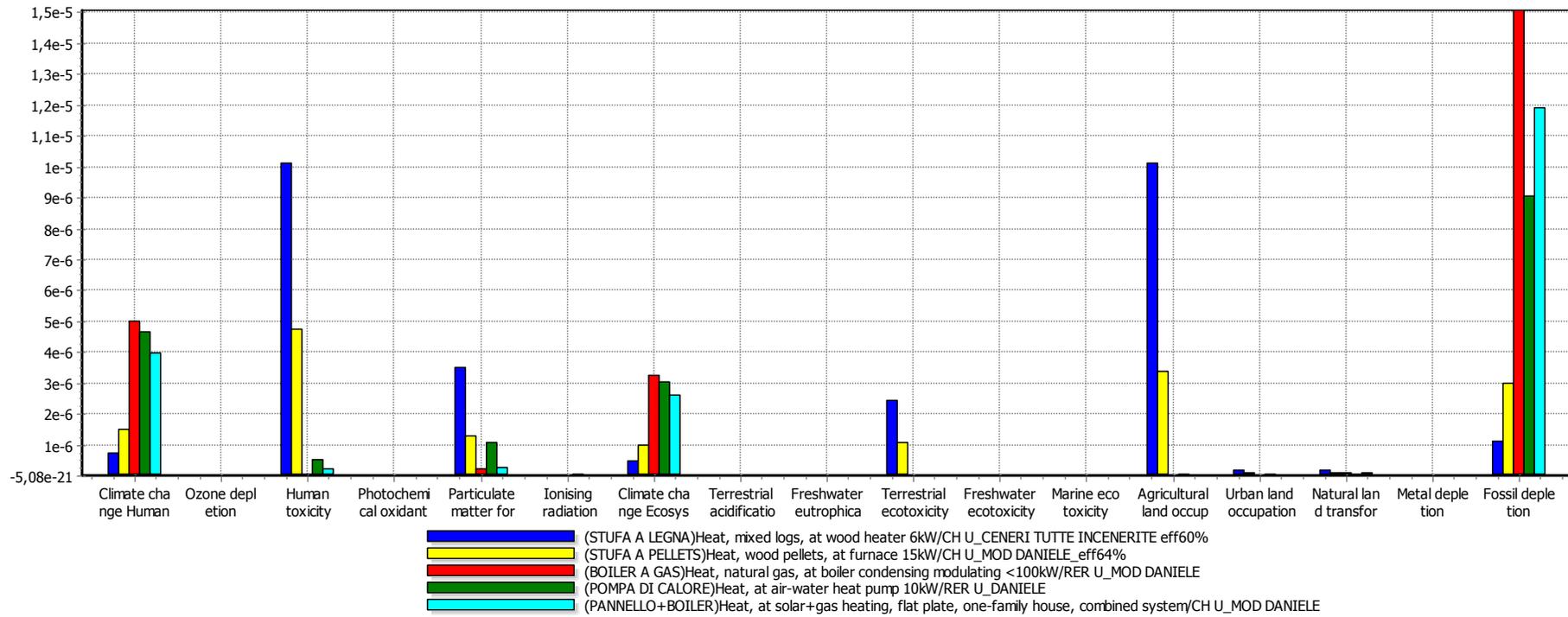


Confronto di processi; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A / Caratterizzazione

Tabella 24 Caratterizzazione: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet	Boiler a gas	Pompa di calore	Pannello solare termico integrato con Boiler a gas
Climate change Human Health	DALY	1,43E-08	3,01E-08	1,01E-07	9,37E-08	8,02E-08
Ozone depletion	DALY	1,84E-12	3,12E-12	2,94E-11	1,46E-10	2,32E-11
Human toxicity	DALY	2,04E-07	9,55E-08	8,95E-10	1,01E-08	4,20E-09
Photochemical oxidant formation	DALY	2,07E-11	7,42E-12	2,76E-12	4,95E-12	2,48E-12
Particulate matter formation	DALY	7,11E-08	2,55E-08	4,58E-09	2,14E-08	5,39E-09
Ionising radiation	DALY	1,83E-11	2,64E-10	2,55E-11	7,61E-10	6,40E-11
Climate change Ecosystems	species.yr	8,07E-11	1,71E-10	5,70E-10	5,31E-10	4,54E-10
Terrestrial acidification	species.yr	1,14E-12	9,00E-13	3,22E-13	1,49E-12	3,29E-13
Freshwater eutrophication	species.yr	1,14E-12	5,28E-13	2,01E-14	2,22E-13	1,13E-13
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	4,28E-10	1,88E-10	1,63E-13	7,76E-13	1,98E-13
Freshwater ecotoxicity	species.yr	8,58E-14	4,68E-14	4,76E-15	4,29E-14	2,32E-14
Marine ecotoxicity	species.yr	3,79E-16	2,12E-16	3,05E-17	1,59E-16	9,14E-17
Agricultural land occupation	species.yr	1,77E-09	5,90E-10	8,35E-13	9,61E-12	3,29E-12
Urban land occupation	species.yr	3,32E-11	1,41E-11	9,83E-13	3,99E-12	1,52E-12
Natural land transformation	species.yr	2,93E-11	1,50E-11	1,43E-11	8,90E-12	1,20E-11
Metal depletion	\$	1,03E-04	1,15E-04	5,26E-05	2,53E-04	2,90E-04
Fossil depletion	\$	3,34E-02	9,12E-02	0,46	0,28	0,36

Figura 50 Normalizzazione: confronto dei cinque scenari di riscaldamento domestico

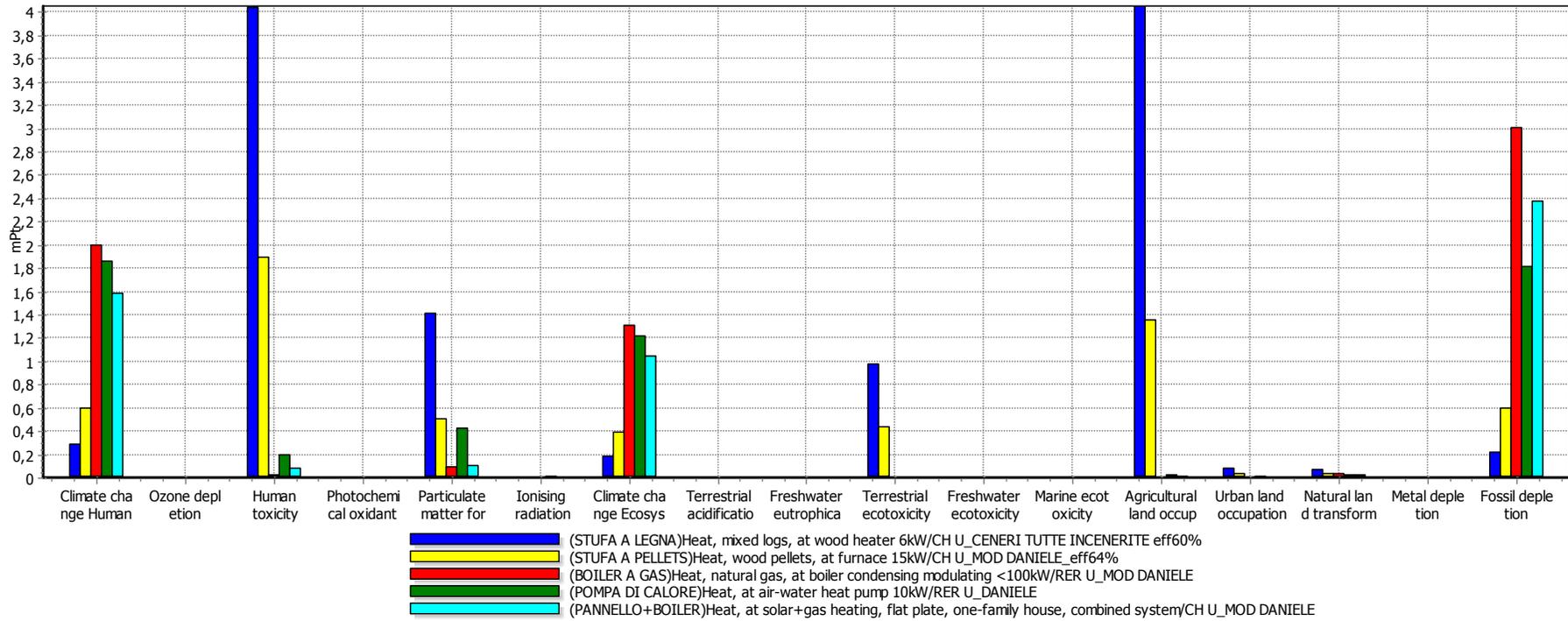


Confronto di processi; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A / Normalizzazione

Tabella 26 Normalizzazione: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet	Boiler a gas	Pompa di calore	Pannello solare termico integrato con Boiler a gas
Climate change Human Health	-	7,06E-07	1,49E-06	4,98E-06	4,64E-06	3,97E-06
Ozone depletion	-	9,09E-11	1,54E-10	1,46E-09	7,21E-09	1,15E-09
Human toxicity	-	1,01E-05	4,73E-06	4,43E-08	4,99E-07	2,08E-07
Photochemical oxidant formation	-	1,02E-09	3,67E-10	1,36E-10	2,45E-10	1,23E-10
Particulate matter formation	-	3,52E-06	1,26E-06	2,27E-07	1,06E-06	2,67E-07
Ionising radiation	-	9,03E-10	1,31E-08	1,26E-09	3,77E-08	3,17E-09
Climate change Ecosystems	-	4,62E-07	9,76E-07	3,26E-06	3,03E-06	2,60E-06
Terrestrial acidification	-	6,49E-09	5,15E-09	1,84E-09	8,50E-09	1,88E-09
Freshwater eutrophication	-	6,54E-09	3,02E-09	1,15E-10	1,27E-09	6,46E-10
Terrestrial ecotoxicity	-	2,45E-06	1,08E-06	9,31E-10	4,44E-09	1,14E-09
Freshwater ecotoxicity	-	4,91E-10	2,68E-10	2,72E-11	2,45E-10	1,33E-10
Marine ecotoxicity	-	2,17E-12	1,21E-12	1,75E-13	9,08E-13	5,23E-13
Agricultural land occupation	-	1,01E-05	3,37E-06	4,78E-09	5,50E-08	1,88E-08
Urban land occupation	-	1,90E-07	8,07E-08	5,62E-09	2,28E-08	8,70E-09
Natural land transformation	-	1,68E-07	8,57E-08	8,17E-08	5,09E-08	6,85E-08
Metal depletion	-	3,39E-09	3,75E-09	1,72E-09	8,27E-09	9,41E-09
Fossil depletion	-	1,09E-06	2,98E-06	1,51E-05	9,06E-06	1,19E-05

Figura 51 Pesatura: confronto dei cinque scenari di riscaldamento domestico

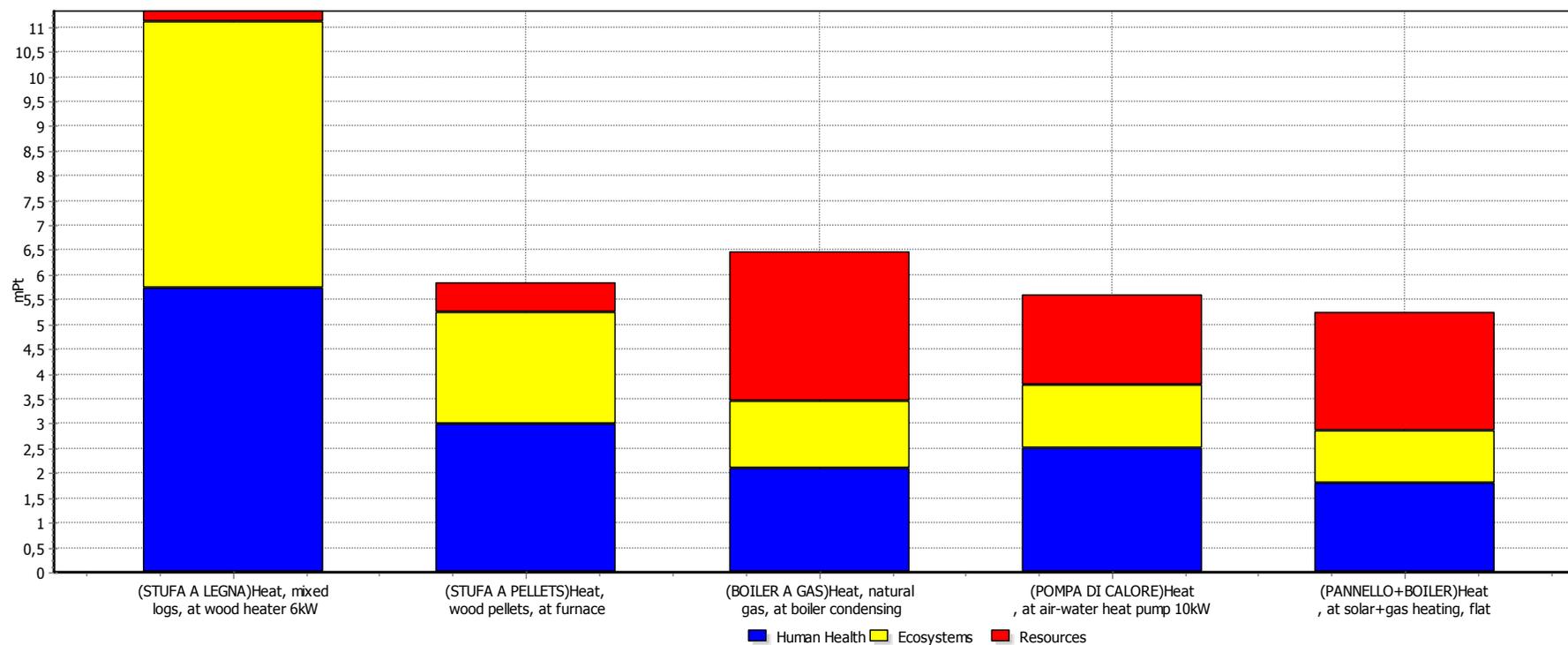


Confronto di processi; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A / Pesa

Tabella 27 Pesatura: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria d'impatto	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet	Boiler a gas	Pompa di calore	Pannello solare termico integrato con Boiler a gas
Climate change Human Health	Pt	2,82E-04	5,97E-04	1,99E-03	1,86E-03	1,60E-03
Ozone depletion	Pt	3,64E-08	6,18E-08	5,83E-07	2,88E-06	4,60E-07
Human toxicity	Pt	4,04E-03	1,90E-03	1,77E-05	2,00E-04	8,32E-05
Photochemical oxidant formation	Pt	4,09E-07	1,47E-07	5,46E-08	9,81E-08	4,91E-08
Particulate matter formation	Pt	1,41E-03	5,05E-04	9,08E-05	4,23E-04	1,10E-04
Ionising radiation	Pt	3,61E-07	5,22E-06	5,05E-07	1,51E-05	1,27E-06
Climate change Ecosystems	Pt	1,85E-04	3,90E-04	1,30E-03	1,21E-03	1,04E-03
Terrestrial acidification	Pt	2,60E-06	2,06E-06	7,36E-07	3,40E-06	7,53E-07
Freshwater eutrophication	Pt	2,62E-06	1,21E-06	4,60E-08	5,08E-07	2,59E-07
Terrestrial ecotoxicity	Pt	9,80E-04	4,31E-04	3,73E-07	1,78E-06	4,54E-07
Freshwater ecotoxicity	Pt	1,96E-07	1,07E-07	1,09E-08	9,81E-08	5,31E-08
Marine ecotoxicity	Pt	8,67E-10	4,85E-10	6,99E-11	3,63E-10	2,09E-10
Agricultural land occupation	Pt	4,05E-03	1,35E-03	1,91E-06	2,20E-05	7,53E-06
Urban land occupation	Pt	7,59E-05	3,23E-05	2,25E-06	9,12E-06	3,48E-06
Natural land transformation	Pt	6,70E-05	3,43E-05	3,27E-05	2,04E-05	2,74E-05
Metal depletion	Pt	6,77E-07	7,49E-07	3,44E-07	1,65E-06	1,88E-06
Fossil depletion	Pt	2,18E-04	6,00E-04	3,013E-03	1,81E-03	2,38E-03

Figura 52 Punteggio singolo: confronto dei cinque scenari di riscaldamento domestico



Confronto di processi; Metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A / Punteggio singolo

Tabella 28 Pesatura: impatto di ciascun scenario per ogni categoria midpoint

Categoria di danno	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet	Boiler a gas	Pompa di calore	Pannello solare termico + Boiler a gas
Human Health	Pt	5,73E-03	3,00E-03	2,10E-03	2,50E-03	1,78E-03
Ecosystems	Pt	5,36E-03	2,24E-03	1,34E-03	1,30E-03	1,08E-03
Resources	Pt	2,19E-04	5,97E-04	3,01E-03	1,81E-03	2,38E-03

12. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo vengono discussi in modo critico ed oggettivo tutti i risultati ottenuti nella fase di valutazione degli impatti, riportati nel paragrafo precedente. In alcuni casi per ottenere una visione complessiva in merito alla discussione è stato necessario ricorrere ad ulteriori istogrammi di valutazione del danno.

12.1 Analisi di contributo

L'analisi di contributo, come accennato nella Parte Generale, è utile per ottenere delle informazioni di massima in merito ai processi che incidono maggiormente all'interno di ciascuno scenario. In questo studio sono state proposte analisi di contributo esclusivamente per i due metodi di riscaldamento a biomassa, poiché lo studio del loro impatto ambientale rappresenta il cuore dell'intero progetto LENS. Individuare quali sono i processi che incidono maggiormente a livello ambientale, permette di focalizzare l'attenzione su di essi nella fase di miglioramento e riduzione degli impatti.

Dalle Figure 43 e 44 riportate nel paragrafo precedente, è evidente come i processi che hanno un maggiore impatto ambientale, per entrambi gli scenari a biomassa, sono quelli relativi alla fase di smaltimento delle ceneri. In particolare si nota come per lo scenario di riscaldamento domestico con stufa innovativa a legna l'impatto globale di tali processi di smaltimento supera il 40%, mentre per lo scenario con stufa a pellet si attesta quasi al 40% del totale. In tali percentuali vengono racchiusi due processi, quello di spandimento delle ceneri su suolo agricolo e quello di incenerimento delle stesse all'inceneritore, processi presenti da default nel software SimaPro. In entrambi i casi risulta che lo scenario di smaltimento che incide maggiormente tra i due è quello relativo allo spandimento su suolo agricolo (circa un 38% nel caso della legna e un 33% per il riscaldamento con pellet).

La gestione delle ceneri da biomassa è disciplinata in Italia dal decreto Ronchi (Regione Lombardia, 2004), nel quale esse vengono classificate come rifiuti speciali non pericolosi e distinte in ceneri pesanti CER[10.01.01] e leggere CER[10.01.03]; pertanto lo spandimento diretto su suolo non è previsto da normativa, poiché spargerle sui terreni significherebbe smaltire un rifiuto non pericoloso. Nonostante quanto riportato sopra abbiamo ritenuto opportuno mantenere lo scenario di smaltimento mediante spandimento su suolo agricolo, poiché tale metodo, anche se senza autorizzazione, è una realtà molto diffusa in Italia. Il motivo che spinge i sostenitori dell'utilizzo delle ceneri in campagna va ricercato nell'assunzione che in questo modo si possa evitare l'utilizzo di fertilizzanti artificiali, poiché con lo spandimento si è in grado di chiudere il ciclo, riportando al terreno sostanze, come

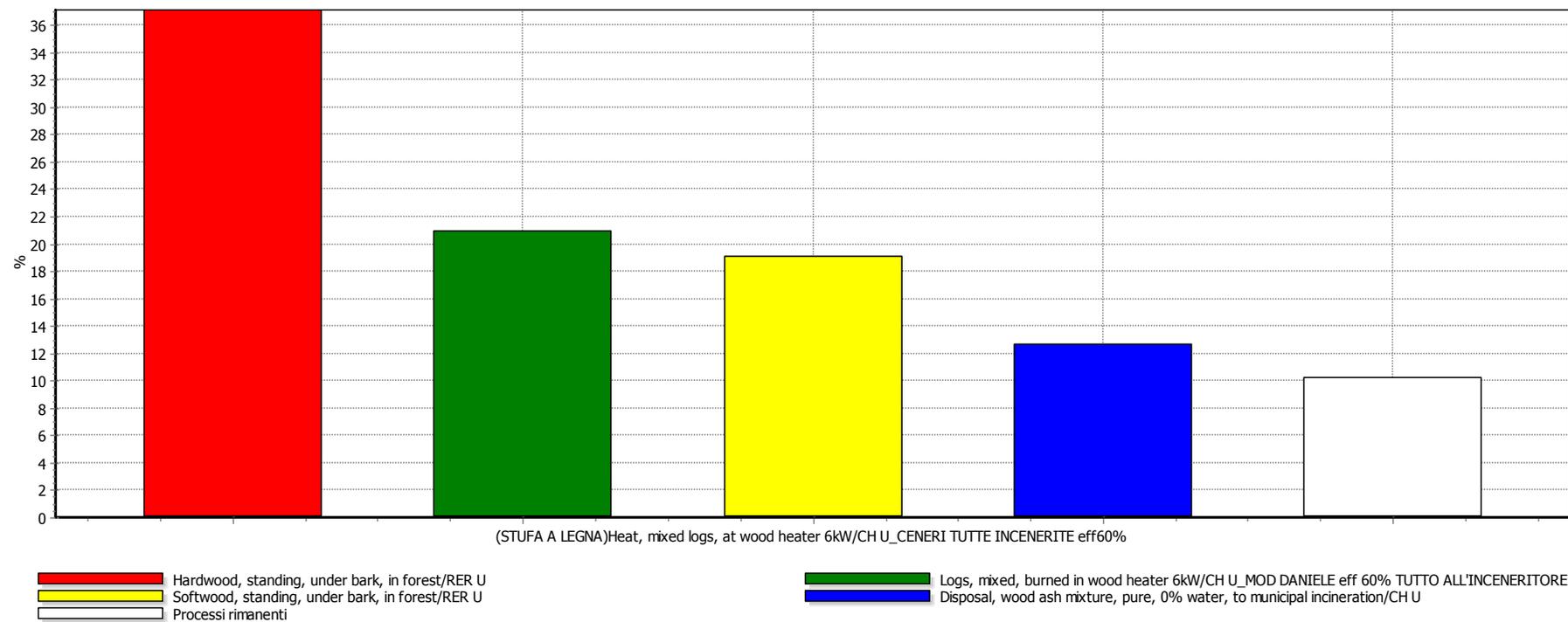
elementi minerali e metalli pesanti, sottratti dalla pianta al momento della crescita (Regione Lombardia, 2004; Sarembo, 2009).

Dal momento che il nostro studio ha lo scopo di verificare i carichi ambientali di tali processi, è sembrato logico verificare cosa comporterebbe, in termini di impatto, sostituire lo spandimento diretto delle ceneri con un metodo di smaltimento più consona con la normativa italiana: l'incenerimento. Di seguito vengono riportati due istogrammi che mostrano l'analisi di contributo per entrambi gli scenari, stufa a legna e stufa a pellet, in cui l'intero quantitativo di ceneri è inviato all'inceneritore. Si nota immediatamente una riduzione nell'impatto del singolo processo, passando dal 40% circa, a poco più del 12% per entrambi gli scenari. Questa alternativa porterebbe ad una drastica diminuzione del carico del processo di riscaldamento domestico sul totale.

La fase di combustione della biomassa incide sul totale in maniera leggermente diversa in base alla tipologia di scenario considerato. Di fatti essa si attesta attorno al 15% del totale, per il processo di riscaldamento con stufa innovativa a legna, mentre per l'utilizzo di pellet l'impatto si abbassa al 10%. Questo andamento non stupisce, poiché è logico supporre che strumenti che utilizzino combustibili differenti possano avere diversi impatti sul totale. Maggiore conferma di quanto detto si potrà avere nella fase di interpretazione della valutazione del danno, dove osservando i vari istogrammi sarà possibile ottenere maggiori informazioni a riguardo.

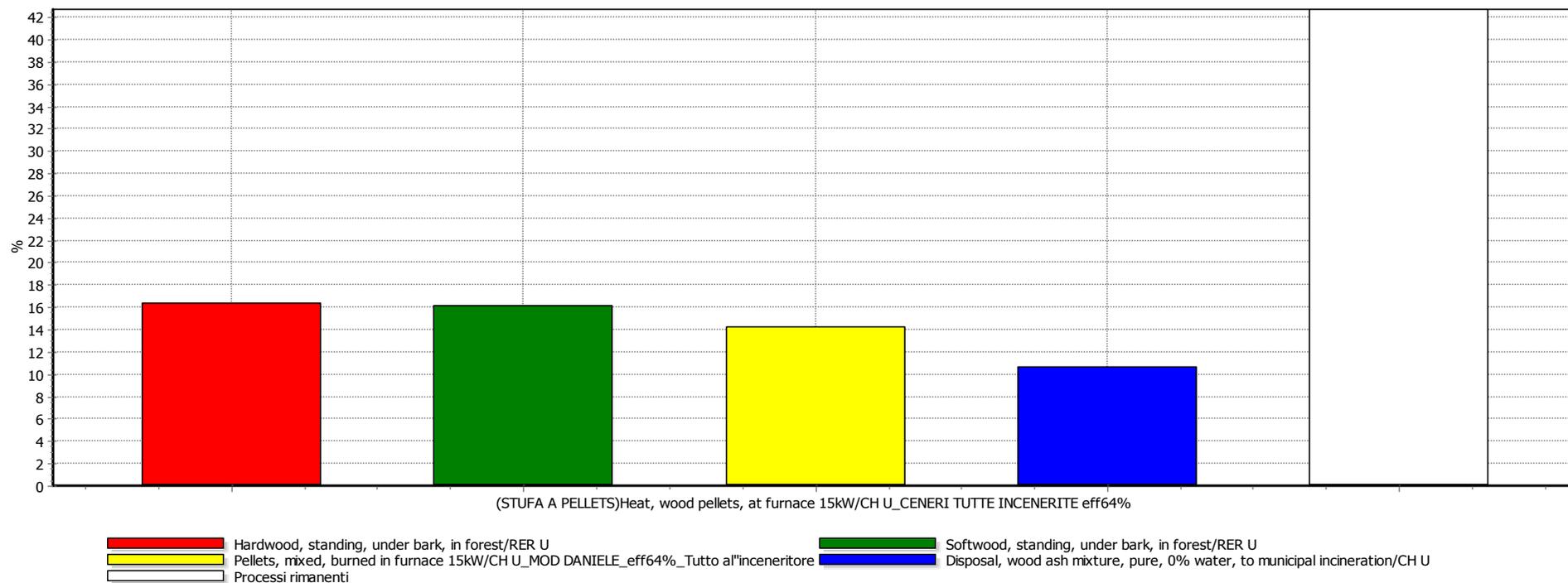
Altri contributi rilevanti all'impatto totale vengono forniti dai processi che includono l'occupazione del territorio per la crescita delle piante, che per il processo a legna si aggira attorno al 47% mentre per il riscaldamento domestico con stufa a pellet è attorno al 23%. Ovviamente i modellatori dei processi hanno dovuto rifarsi a due alberi modello per la messa a punto di tali processi. Le piante di riferimento sono state il faggio per gli hardwood e l'abete rosso per i softwood; da esse è stato possibile ricavare il quantitativo di CO₂ e l'estensione della terra necessarie per la loro crescita. Le due percentuali hanno valori così differenti probabilmente perché nel caso dello scenario a pellet la materia prima deriva da scarti di lavorazione e non direttamente da suolo agricolo. Nonostante la differenza entrambe incidono molto sul contributo globale al processo, ciò è indice dell'importanza di tutte le campagne di prevenzione, volte all'ottenimento di una filiera controllata del settore. Di fatti il software non tiene minimamente in considerazione le operazioni volte a garantire l'integrità di boschi e foreste, come il taglio controllato ed il reintegro; probabilmente, se tali accorgimenti venissero inclusi, gli impatti di tali categorie sarebbero inferiori.

Figura 53 Analisi di contributo dello scenario di riscaldamento domestico con stufa innovativa a legna, smaltimento delle ceneri all'inceneritore



Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff64%'; Metodo: ReCiPe I

Figura 54 Analisi di contributo dello scenario di riscaldamento domestico con stufa a pellet, smaltimento delle ceneri all'inceneritore



Confronto di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff60%' con 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_CENERI TUTTE INCENERITE eff64%'; Metodo: ReCIpe I

Tabella 29 Analisi di contributo per entrambi gli scenari di riscaldamento domestico, smaltimento delle ceneri all'inceneritore

Processo	Unità	Stufa Innovativa a Legna	Stufa a Pellet
Processi rimanenti	%	10,19	56,92
Hardwood, standing, under bark, in forest/RER U	%	37,09	16,31
Logs, mixed, burned in wood heater 6kW/CH U_tutto all'inceneritore	%	20,96	-
Softwood, standing, under bark, in forest/RER U	%	19,12	16,15
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/CH U	%	12,64	10,62
Pellets, mixed, burned in furnace 15kW/CH U_Tutto all'inceneritore	%	-	14,2

12.2 Valutazione del danno

La Figura 47 rappresenta gli impatti che ciascuno scenario a biomassa ha sulle singole categorie di impatto di endpoint. Dall'istogramma è evidente come il processo di riscaldamento domestico con stufa innovativa a legna abbia un impatto maggiore rispetto all'altro per due categorie di impatto su tre. Ciò equivale a dire che il riscaldamento con stufa a legna presenta impatti superiori al pellet per circa i $\frac{2}{3}$ delle categorie di impatto midpoint (Figura 45).

I carichi ambientali dello scenario a legna presentano ripercussioni maggiori sulla salute umana e sulla qualità dell'ecosistema. Ciò trova spiegazione nella Figura 48, nella quale si riportano i carichi per ogni categoria midpoint, rappresentando il punteggio singolo di ogni scenario. Dall'istogramma è evidente come il riscaldamento con stufa a legna abbia un impatto molto elevato (circa il doppio rispetto al pellet) per le seguenti categorie:

- Particulate matter formation
- Human toxicity
- Terrestrial ecotoxicity
- Marine ecotoxicity
- Agricultural land occupation

Come si può constatare dagli istogrammi di normalizzazione e pesatura (Figure 45 e Figura 46) le prime due categorie riportate nell'elenco sono anche quelle che hanno un maggior contributo sulla *salute umana*. La prima categoria dell'elenco ci dà informazioni riguardo alla formazione di particolato atmosferico, inteso come PM 10, dovuto alla combustione di biomassa. È in linea con le previsioni constatare che il processo che impiega legna produca un quantitativo pari al doppio rispetto a quello che scaturisce dalla combustione di pellet, poiché mentre quest'ultimo è un combustibile più compatto ed omogeneo sia nelle dimensioni che nelle caratteristiche chimico fisiche, mentre la legna presenta spesso delle criticità in tali ambiti, che favoriscono una combustione meno “pulita”. Si trova conferma dei risultati ottenuti mediante l'analisi di LCA anche nel documento *La combustione del legno-fattori di emissione e quadro normativo*, redatto dall'AIEL (2011), il quale mostra come la presenza di particolato nei fumi di combustione possa essere dovuta al frequente utilizzo di legna di dimensioni e carico idrico non ottimali. Secondo quanto riportato nello studio, recenti ricerche hanno dimostrato che il range di variazione di concentrazione di particolato negli scarichi è molto ampio: da 20 fino a 5000 mg/Nm³, riscontrando che utilizzando

tronchetti molto grandi si arriva facilmente ai 250 mg/Nm³, mentre se il tenore di umidità è alto si raggiungono facilmente i 500 mg/Nm³ (Figura 55).

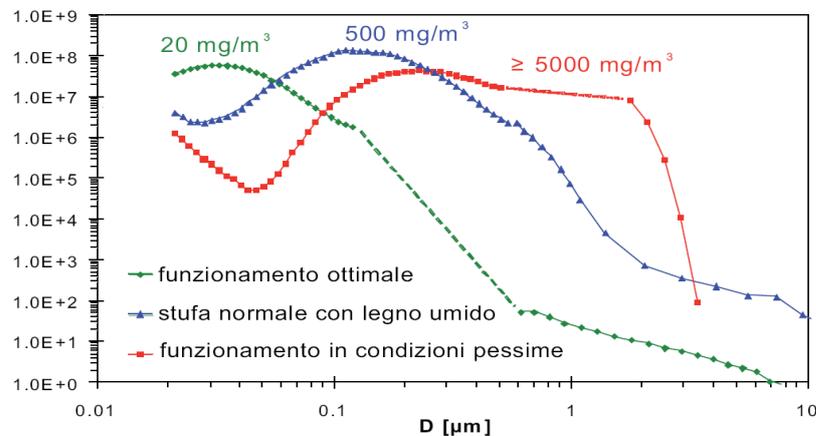


Figura 65 Ripartizione dimensionale del PM e valori di emissione in diverse condizioni di funzionamento [2]

Probabilmente sarebbe interessante avere a disposizione un modello che permetta di prevedere gli impatti in termini di produzione di particolato con dimensioni inferiori ai 10µm, ad esempio PM 2,5 e/o PM 1, poiché maggiormente pericolosi per la salute umana, a causa della loro capacità di penetrare più in profondità nell'apparato respiratorio. Attualmente non si dispone di modelli con i quali ottenere tali informazioni, ma per soddisfare queste richieste si potrebbe intervenire con uno strumento complementare agli studi di LCA, un monitoraggio diretto delle emissioni al camino.

L'altro indicatore che incide notevolmente sulla categoria salute umana è la *Human toxicity*. Anche in questo caso lo scenario di combustione della legna presenta un impatto circa doppio rispetto al pellet; ciò probabilmente è associato alle emissioni di sostanze tossiche per la salute umana nei fumi di combustione, sommate allo spandimento di ceneri su suolo agricolo. L'effetto combinato di questi due fattori può essere deleterio per la salute umana, causando gravi malattie all'apparato respiratorio e non solo.

Le altre tre categorie di impatto midpoint si riferiscono invece all'indicatore qualità dell'ecosistema. Anche in questo caso, avendo ciascuna un carico doppio rispetto allo scenario a pellet, è confermato quanto riportato nella Figura 47. Delle tre l'ultima, *Agricultural land occupation*, è quella che presenta un carico superiore e molto maggiore al doppio rispetto allo scenario a pellet. La spiegazione di ciò deriva dalla differenza nella fonte di approvvigionamento delle materie prime, che per la produzione di legna sono gli alberi, mentre per il pellet sono scarti da segheria. È evidente come per i primi il suolo occupato risulta maggiore e pertanto più impattante rispetto agli scarti, sottoprodotto delle segherie.

Lo scenario di riscaldamento domestico mediante stufa a pellet presenta impatti maggiori, rispetto al precedente, nella categoria di impatto endpoint *consumo di risorse* (Figura 47). Di fatti scomponendo il processo nelle singole categorie midpoint, Figura 48, si nota come il carico associato alle voci *Fossil depletion e in piccola parte alla categoria Metal depletion* sia superiore rispetto alle stesse relative all'altro processo a biomassa. Probabilmente ciò è dovuto alla fase di pellettizzazione, che, come descritto nella Parte Generale, utilizza molti macchinari che necessitano sia di ingenti quantità di metalli per la loro costruzione sia di combustibili fossili che ne permettono il funzionamento. In questo caso è verosimile che il maggior problema riguardi la prima voce, il consumo di combustibili fossili, poiché i metalli impiegati nella fase di costruzione possono essere in gran parte recuperati nella fase di fine vita delle macchina, mentre l'utilizzo di combustibili non rinnovabili, nonostante sia relativamente basso, contribuisce a suo modo all'assottigliamento di tali riserve. Una soluzione potrebbe venire dall'utilizzo di fonti alternative di energia, come la stessa biomassa, che potrebbe essere impiegata per alimentare in parte tali macchinari.

Oltre al consumo di risorse, lo scenario di riscaldamento attraverso stufa a pellet, presenta dei carichi ambientali superiori per la categoria *Climate change*, la quale nel Recipe 2008 è stata suddivisa a sua volta in due sottocategorie: *Climate change Human Health* e *Climate change Ecosystem*. Tali indicatori si riferiscono rispettivamente al danno diretto del cambiamento climatico sulla salute umana e sull'ecosistema. In particolare il primo descrive come varia il rischio di danni sulla salute in funzione di una variazione della temperatura, per cinque effetti sulla salute in differenti regioni nel mondo, mentre il secondo è una predizione dell'estinzione di specie su scala globale, per tre scenari differenti. Come si nota dagli istogrammi di normalizzazione e pesatura (Figure 45 e Figura 46) il carico ambientale dello scenario a pellet, per questa categoria di impatto, è circa il doppio rispetto a quello della legna. Probabilmente questo scostamento è dovuto al tipo di combustibile impiegato, poiché in entrambi i casi la biomassa legnosa assorbe CO₂ nell'arco della propria vita, ma il processo che porta alla produzione del pellet genera una maggior quantità di gas *climalteranti* rispetto all'ottenimento di tronchetti. Ciò è dovuto alle innumerevoli fasi ed attrezzature impiegate nella pellettizzazione, che necessariamente impongono il consumo di risorse ed energia, diversamente dalla filiera della legna, più breve e meno dispendiosa.

Dal confronto con gli scenari di riscaldamento domestico alternativo (Figura 49), si nota come i due processi a biomassa abbiano carichi superiori agli altri tre per dieci categorie d'impatto su diciotto, cioè per circa il 55% dei casi. I restanti indicatori vedono un ribaltamento della situazione: in particolare, le due sottocategorie di cambiamento climatico hanno al primo

posto lo scenario con boiler a gas, seguito da quello utilizzante la pompa di calore ed infine il processo di riscaldamento con solare termico combinato alla caldaia a metano. Quest'ultimo scenario, a causa dell'ingente quantitativo di metalli necessari alla produzione del modulo solare, è al primo posto nella categoria *Metal depletion*, seguito dal riscaldamento attraverso pompa di calore, mentre si posiziona al secondo posto nella categoria *Fossil fuel depletion*, preceduto dallo scenario di riscaldamento mediante boiler a gas.

Esaminando in dettaglio l'istogramma della normalizzazione (Figura 50), utilizzato per fornire una scala di significatività dei contributi, è possibile focalizzare l'attenzione sulle categorie che incidono maggiormente, rispetto alle altre. In particolare si nota una netta differenza tra gli scenari a biomassa e quelli alternativi nelle seguenti categorie: Human toxicity, Terrestrial ecotoxicity, Particulate matter formation e Agricultural land occupation, per le quali i processi di riscaldamento domestico con stufa a legna ed a pellet presentano un impatto notevolmente maggiore. Non sorprende un dislivello così elevato per le categorie di occupazione del suolo agricolo e di formazione di particolato, entrambe strettamente connesse alla tipologia di combustibile, mentre sorprende la differenza sostanziale con gli scenari alternativi per gli indicatori di tossicità umana e dell'ecosistema. Questo andamento così pronunciato degli scenari a biomassa è confermato anche dalla Figura 52, dove, per ogni scenario, sia ha una distinzione in categorie di impatto endpoint. In merito ai carichi su salute umana e qualità dell'ecosistema si evince come la stufa innovativa a legna abbia il maggior impatto, doppio rispetto allo scenario a pellet, che si posiziona così al secondo posto. In tali categorie gli altri scenari di confronto presentano carichi ambientali relativamente inferiori alla metà di quelli della stufa a legna, mentre mostrano un impatto assai più rilevante per il consumo di risorse.

12.3 Analisi di incertezza

Negli studi sperimentali non è sufficiente eseguire delle misurazioni e trarre le rispettive conclusioni per garantire la validità del lavoro, ma è indispensabile avvalorare i risultati ottenuti attraverso un'analisi di incertezza. Per far ciò è stata utilizzata l'analisi Monte Carlo, una base statistica di calcolo descritta in dettaglio nella Parte Generale, applicata al confronto tra gli scenari di riscaldamento domestico mediante stufa innovativa a legna e stufa a pellet. Il motivo che ha spinto a prendere in considerazione esclusivamente i due scenari a biomassa, va ricercato negli obiettivi dello studio, che pongono in primo piano l'ottenimento di informazioni sugli impatti di tali metodi di riscaldamento.

L'incertezza che viene presa in considerazione dall'analisi Monte Carlo è esclusivamente quella associata a ciascun dato nella fase di inventario, che tiene conto di tutte le possibili fonti di variabilità del valore (l'incertezza della misurazione, la variabilità del processo, del metodo di acquisizione, della composizione dell'unità funzionale, etc.).

Precedentemente, nella Tabella 13, riportata nella Parte Generale, sono state elencate le stime dei valori di incertezza impiegati nell'analisi di inventario. Indicativamente per attribuire i valori di incertezza dei processi principali di ogni scenario si è seguita tale linea guida:

incertezza pari a 1 per tutti i processi in input

- combustibile
- trasporti
- infrastruttura

valore di incertezza compreso da 1 a 2 per tutti i processi in output

- emissioni in atmosfera
- rifiuto ed emissioni al trattamento

Per tutti i processi contenuti in ciascuno scenario è stata scelta la distribuzione Lognormale, presente da default nel Database, con un intervallo di confidenza del 95%.

Sulla base delle indicazioni qui sopra elencate, di seguito sono riportati i risultati delle analisi condotte. La rappresentazione mediante istogrammi consente di visualizzare il numero di volte che l'impatto dello scenario di riscaldamento mediante stufa a legna (A) è risultato superiore di quello associato al processo di riscaldamento a pellet (B), per ciascuna categoria. Precedentemente in Figura 45 viene rappresentato l'istogramma valutazione del danno-caratterizzazione, che mostra come lo scenario di riscaldamento a pellet presenti per 11

categorie su 17, circa il 64,7% del totale, un impatto significativamente inferiore rispetto allo scenario a legna. Tali risultati vengono in parte avvalorati e riconfermati dall'analisi di incertezza, riportata in Figura 56, dalla quale emerge che lo scenario di riscaldamento con stufa a pellet (B) è migliore dell'altro, in termini di impatto ambientale, per 10 categorie su 17 (58,8%). Di fatti si nota come per la categoria *Natural land transformation* si ha un pareggio tra i due scenari, cioè per il 50% dei casi il processo B è superiore all'A e viceversa. Ciò sta a significare che eseguendo, mediante metodo Monte Carlo, un variazione iterativa dei singoli dati presenti in ogni processo, si ottiene che per questa categoria nessuno scenario prevale sull'altro, diversamente da quanto ottenuto in precedenza dove il processo con stufa a legna aveva impatto doppio del pellet.

Si ritiene che tali risultati siano attendibili, poiché per le 10 categorie in cui lo scenario stufa a pellet è meno impattante dell'altro, 9 hanno ottenuto tali risultati con una frequenza superiore al 99% dei casi ed una prossima al 90%. Inoltre vengono riconfermate le 6 categorie per le quali lo scenario a pellet presenta un impatto superiore alla legna, di cui 5 con una frequenza superiore al 99% dei casi, mentre per la categoria *Metal depletion* il risultato è leggermente più incerto, poiché si ha una frequenza attorno al 70% dei casi in cui il pellet impatta più della legna. Per favorire la visualizzazione del confronto dei risultati ottenuti mediante Analisi di Caratterizzazione ed Analisi di Incertezza attraverso metodo Monte Carlo, si riporta in Tabella 30 un riepilogo di quale scenario prevale sull'altro, estrapolato dalla Figura 45 e Figura 56.

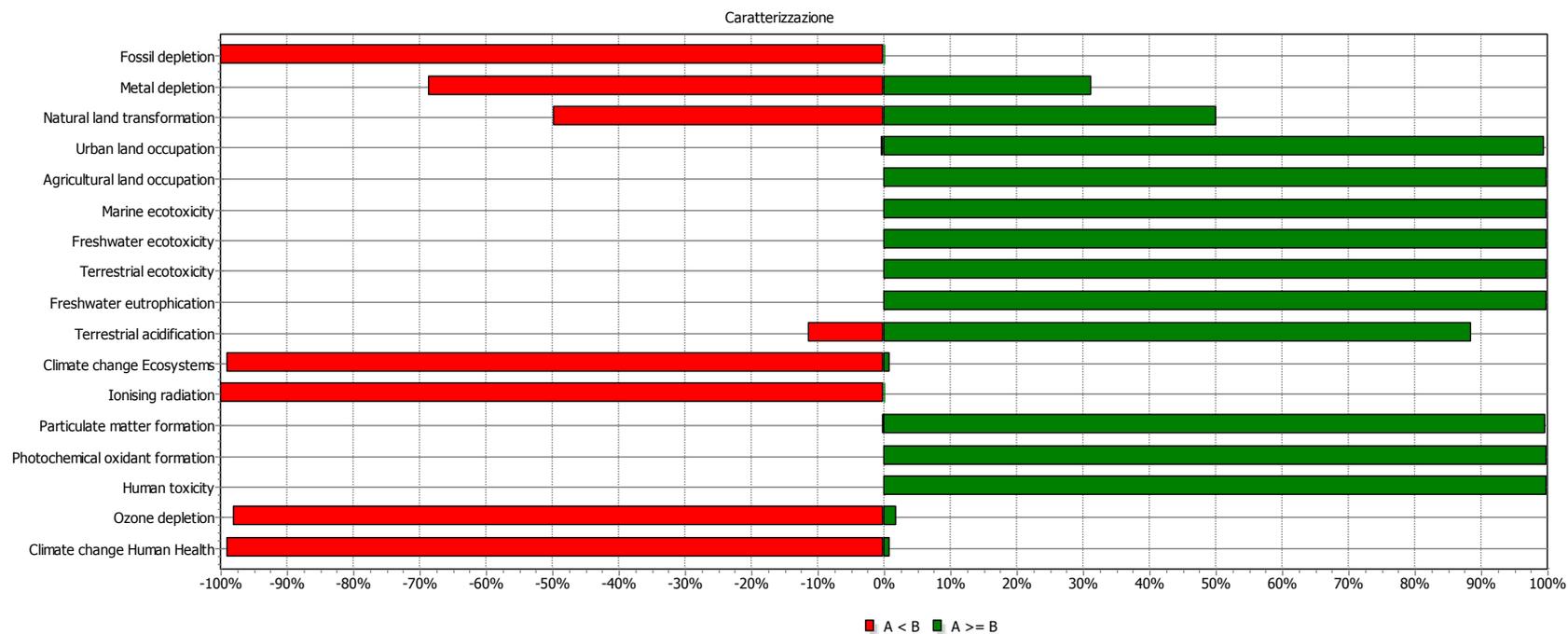
Attraverso la Figura 57 si è in grado di validare i dati ottenuti nei grafici precedenti, confermando che per le categorie di impatto endpoint *salute umana* e *qualità dell'ecosistema* si ottiene che lo scenario di riscaldamento con stufa innovativa a legna è peggiore rispetto al pellet, con una frequenza dei casi rispettivamente >99% e >95% dei casi. Mentre come ulteriore conferma lo scenario a pellet è peggiore rispetto alla legna nella categoria *consumo di risorse*, dove presenta impatti maggiori con una frequenza >99% dei casi.

In conclusione nella Figura 58 il risultato dell'analisi di incertezza è presentato in termini di punteggio singolo, per mostrare come lo scenario di riscaldamento domestico con stufa a pellet sia migliore nei confronti di quello a legna, ad un livello di confidenza del 95% e per una percentuale >99% dei risultati della simulazione statistica effettuata.

Tabella 30 Riepilogo del confronto analisi di caratterizzazione vs analisi Monte Carlo

Analisi di Caratterizzazione			Analisi Monte Carlo	
scenario stufa a legna	scenario stufa a pellet	categorie di Impatto	scenario stufa a legna	scenario stufa a pellet
	o	Climate change Human Health		o
	o	Ozone depletion		o
o		Human toxicity	o	
o		Photochemical oxidant formation	o	
o		Particulate matter formation	o	
	o	Ionising radiation		o
	o	Climate change Ecosystems		o
o		Terrestrial acidification	o	
o		Freshwater eutrophication	o	
o		Terrestrial ecotoxicity	o	
o		Freshwater ecotoxicity	o	
o		Marine ecotoxicity	o	
o		Agricultural land occupation	o	
o		Urban land occupation	o	
o		Natural land transformation	o	o
	o	Metal depletion		o
	o	Fossil depletion		o

Figura 56 Analisi Monte Carlo: Legna vs Pellet, Caratterizzazione

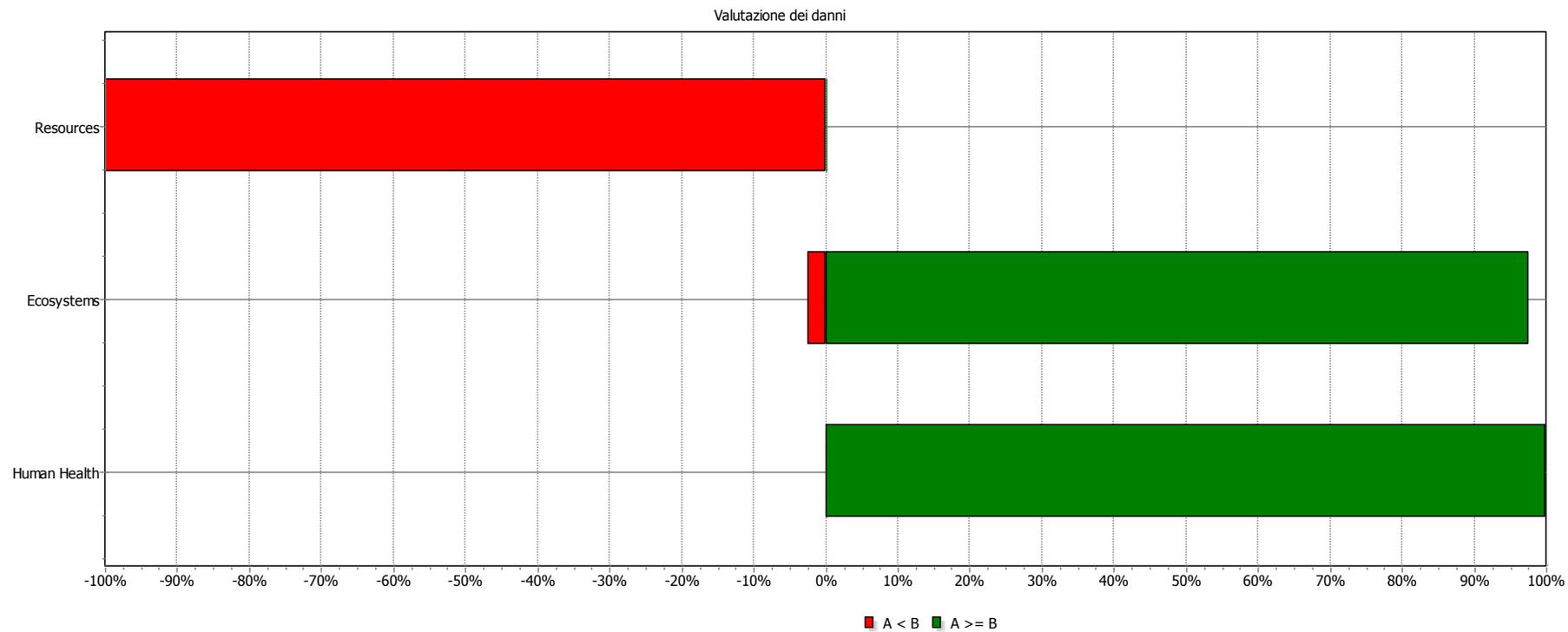


Analisi di incertezza di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_MOD DANIELE eff 60%' (A) meno 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%' (B), metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A , intervallo di confidenza: 95 %

Tabella 31 Risultati dell'Analisi Monte Carlo Legna vs Pellet, Caratterizzazione

Categoria d'impatto	A >= B	Media	Mediana	SD	CV (Coefficiente di Variazione)	2,50%	97,50%	Err. std. di media
Agricultural land occupation	100%	1,18E-09	1,15E-09	4,39E-10	37,10%	4,29E-10	2,23E-09	1,17E-02
Climate change Ecosystems	1%	-8,85E-11	-8,86E-11	3,64E-11	-41,10%	-1,60E-10	-1,40E-11	-1,3E-02
Climate change Human Health	1%	-1,56E-08	-1,56E-08	6,42E-09	-41,10%	-2,83E-08	-2,47E-09	-0,01
Fossil depletion	0%	-5,71E-02	-5,44E-02	1,68E-02	-29,50%	-9,45E-02	-2,97E-02	-9,33E-03
Freshwater ecotoxicity	100%	4,00E-14	3,53E-14	2,11E-14	52,80%	1,26E-14	9,51E-14	1,67E-02
Freshwater eutrophication	100%	6,39E-13	5,08E-13	5,03E-13	78,80%	1,41E-13	1,73E-12	2,49E-02
Human toxicity	100%	1,13E-07	9,62E-08	7,52E-08	66,70%	3,44E-08	2,73E-07	0,02
Ionising radiation	0%	-2,60E-10	-1,68E-10	3,13E-10	-120%	-1,08E-09	-6,72E-11	-0,04
Marine ecotoxicity	100%	1,72E-16	1,57E-16	8,47E-17	49,20%	5,51E-17	3,68E-16	0,02
Metal depletion	31,30%	-1,03E-05	-1,09E-05	2,20E-05	-213%	-5,25E-05	3,13E-05	-0,07
Natural land transformation	50,20%	7,27E-12	1,44E-12	5,92E-10	8,13E+01	-1,18E-09	1,16E-09	2,57
Ozone depletion	1,90%	-1,26E-12	-1,19E-12	6,46E-13	-51,40%	-2,79E-12	-8,53E-14	-0,02
Particulate matter formation	99,90%	4,58E-08	4,71E-08	8,74E-09	19,10%	2,53E-08	5,99E-08	6,04E-03
Photochemical oxidant formation	100%	1,33E-11	1,32E-11	2,43E-12	18,30%	8,81E-12	1,82E-11	5,80E-03
Terrestrial acidification	88,60%	2,41E-13	2,31E-13	2,07E-13	86%	-1,51E-13	6,60E-13	0,03
Terrestrial ecotoxicity	100%	2,49E-10	2,00E-10	1,91E-10	76,80%	6,21E-11	6,67E-10	0,02
Urban land occupation	99,60%	1,94E-11	1,88E-11	7,71E-12	39,70%	5,95E-12	3,70E-11	0,01

Figura 57 Analisi Monte Carlo: Legna vs Pellet, Valutazione dei danni

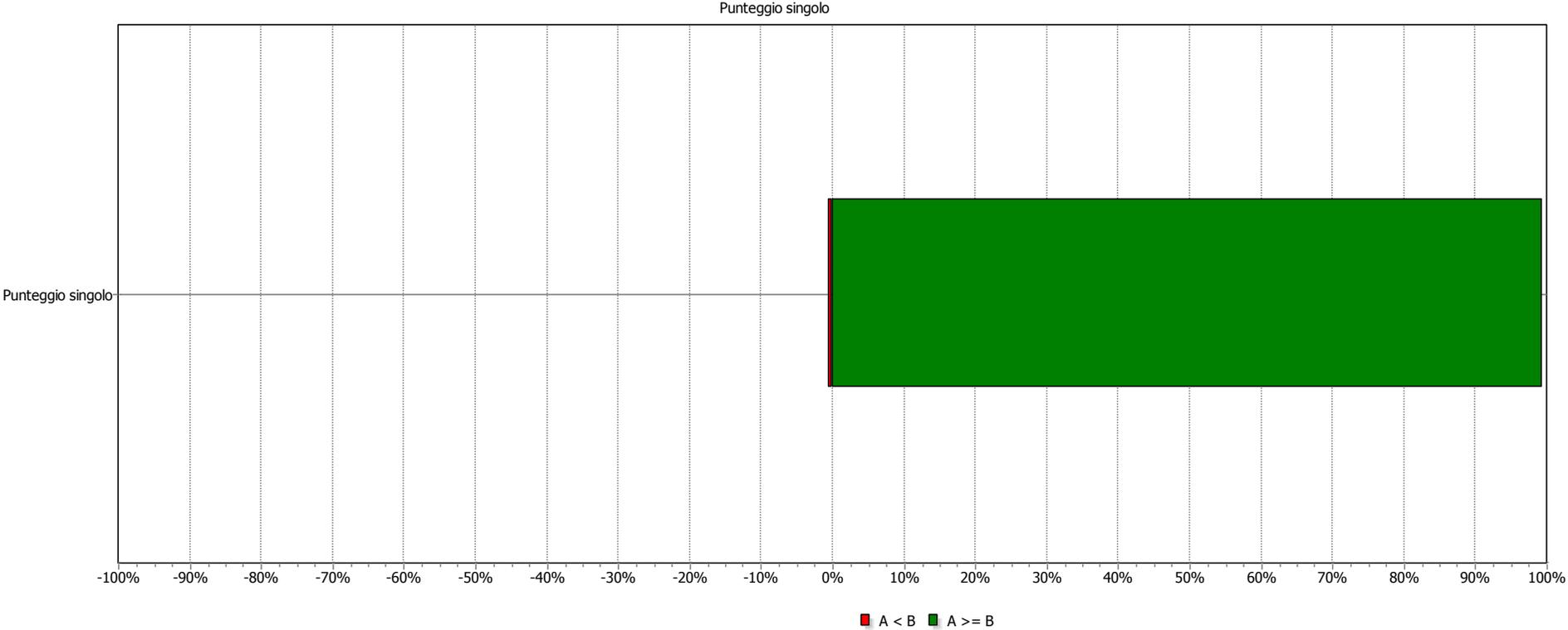


Analisi di incertezza di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_MOD DANIELE eff 60%' (A) meno 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%' (B), metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A , intervallo di confidenza: 95 %

Tabella 32 Risultati dell'Analisi Monte Carlo Legna vs Pellet, Valutazione dei danni

Categoria di danno	A >= B	Media	Mediana	SD	CV (Coefficiente di Variazione)	2,50%	97,50%	Err. std. di media
Ecosystems	97,60%	1,37E-09	1,31E-09	7,85E-10	57,20%	6,77E-12	3,16E-09	1,81E-02
Human Health	100%	1,43E-07	1,26E-07	7,71E-08	54,10%	5,68E-08	3,04E-07	1,71E-02
Resources	0%	-5,71E-02	-5,44E-02	0,0169	-29,50%	-9,46E-02	-0,0297	-9,34E-03

Figura 58 Analisi Monte Carlo: Legna vs Pellet, Punteggio singolo



Analisi di incertezza di 1 MJ '(STUFA A LEGNA)Heat, mixed logs, at wood heater 6kW/CH U_MOD DANIELE eff 60%' (A) meno 1 MJ '(STUFA A PELLETS)Heat, wood pellets, at furnace 15kW/CH U_MOD DANIELE_eff64%' (B), metodo: ReCiPe Endpoint (H) V1.04 / Europe ReCiPe H/A , intervallo di confidenza: 95 %

Tabella 33 Risultati dell'Analisi Monte Carlo Legna vs Pellet, Punteggio singolo

Categoria di danno	A >= B	Media	Mediana	SD	CV (Coefficiente di Variazione)	2,50%	97,50%	Err. std. di media
Punteggio singolo	99,50%	5,59E-03	5,27E-03	2,68E-03	47,90%	1,29E-03	112E-02	1,52E-02

13. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di Tesi è stato messo a punto con lo scopo di indagare l'impatto ambientale di sistemi di riscaldamento termico a biomassa, in particolare a legna ed a pellet. Questo studio è stato condotto all'interno del progetto L.EN.S. (Legno ENergia Salute), un programma coordinato dall'Università degli Studi di Milano – Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio (DISAT), nato dall'esigenza di fornire delle risposte a perplessità riguardanti gli impatti ambientali e le ripercussioni sulla salute umana di mezzi di riscaldamento domestico a biomassa. Tali incertezze hanno richiesto l'emanazione di una normativa specifica, Legge Regionale 11 Dicembre 2006, n.24 (Regione Lombardia), con la quale, per garantire la prevenzione e la riduzione delle emissioni nell'atmosfera, sono stati banditi sistemi di riscaldamento domestico utilizzando biomassa. Pertanto, lo scopo di tale studio è stato quello di integrare le attività di monitoraggio ed analisi, eseguite dagli altri enti, con l'esecuzione di un'analisi LCA, *Life Cycle Assessment*, uno strumento che permette di indagare il carico ambientale di processi e prodotti nel loro intero ciclo di vita, fornendo un'istantanea utile a programmare miglioramenti futuri. Grazie alla sua flessibilità e alla possibilità di considerare gli impatti derivanti da tutte le fasi di un ciclo di vita, tale metodologia è oggi impiegata in un numero sempre crescente di settori, che richiedono tuttavia competenze e conoscenze specifiche, quali quelle di un chimico industriale.

Come è stato illustrato nel corso del lavoro eseguire un'analisi di LCA è inevitabilmente affetta da errori, poiché comporta un elevato grado di soggettività nelle ipotesi effettuate e nella raccolta dei dati, utili per la modellazione degli scenari, nonché nell'interpretazione e valutazione dei risultati. Pertanto, è bene ricordare che i risultati ottenuti dovranno essere considerati all'interno dei confini di sistema e delle assunzioni presi in considerazione: ciò implica che i risultati ottenuti e le considerazioni effettuate siano limitate al solo confronto degli scenari indagati e non assunte a livello di validità generale. Inoltre, proprio dell'analisi LCA è il carattere iterativo: ciò implica che i risultati ottenuti costituiscano il punto di partenza per approfondimenti e analisi di inventario caratterizzate da maggiore qualità dei dati al fine di garantire una modellazione quanto più realistica possibile del sistema in oggetto.

In merito a ciò, per soddisfare gli obiettivi dello studio è stato deciso di focalizzare l'attenzione sul riscaldamento domestico fornito da due sistemi a biomassa: 1) stufa innovativa a legna e 2) stufa a pellet. Entrambi gli scenari sono stati analizzati e confrontati; successivamente, per una maggiore completezza dell'analisi e per una stima qualitativa dei miglioramenti ottenibili i confini di sistema sono stati estesi ad altre tecnologie di

riscaldamento domestico considerate tra le migliori disponibili allo stato attuale.: 3) boiler a gas, 4) solare termico integrato ad una caldaia a gas e 5) pompa di calore elettrica.

I risultati dello studio mostrano complessivamente che confrontando i due scenari a biomassa, il processo di riscaldamento domestico mediante legna presenta impatti superiori in particolare per le categorie di *particulate matter formation* e *human toxicity*, oltre che per *photochemical oxidation formation*, *terrestrial- marine- e freshwater ecotoxicity*, *agricultural* e *urban land occupation* ed altre. Ciò si ripercuote in carichi ambientali superiori nella categorie di endpoint; *salute umana* e *qualità dell'ecosistema*, mentre lo scenario a pellet presenta un maggior consumo di risorse rispetto al precedente, principalmente combustibili fossili ed in piccola parte anche metalli, dovuto principalmente alla fase di pellettizzazione. Inoltre, diversamente dallo scenario a legna, la combustione di pellet ha un impatto rilevante nella categorie *cambiamento climatico*; anche in questo caso la motivazione è da attribuire probabilmente alla fase di produzione del combustibile e non allo stadio di combustione. Complessivamente, il sistema di riscaldamento a legna raggiunge l'impatto più alto, probabilmente a causa delle caratteristiche chimico-fisiche del combustibile, che è tra i fattori che incidono maggiormente nella formazione di materiale particolato. Inoltre, analizzando i due processi, mediante l'*analisi di contributo*, si nota che per entrambi l'impatto del processo di combustione si colloca in seconda posizione se paragonato ai processi relativi allo smaltimento delle ceneri di combustione, soprattutto per quelle sparse su suolo agricolo. Ciò ha suggerire di indagare la sostituzione del processo tradizionale, con uno smaltimento controllato in inceneritore, constatando una netta diminuzione degli impatti.

Anche dal confronto con gli altri tre scenari di riscaldamento domestico alternativi, si evince che i processi di riscaldamento a biomassa comportino i maggiori impatti nelle categorie di tossicità umana, formazione di particolato, ecotossicità (terrestre, marina e dell'acqua), occupazione del suolo agricolo ed urbano ed anche di trasformazione naturale del territorio; mentre si nota come gli scenari alternativi presentino carichi ambientali superiori nelle categorie di cambiamento climatico e consumo delle risorse (metalli e combustibili fossili).

A conferma dei risultati ottenuti è stata infine eseguita un'*analisi di incertezza*, attraverso il metodo statistico Monte Carlo, con un livello di confidenza del 95%.

L'*analisi di incertezza* è stata applicata esclusivamente ai due scenari a biomassa, poiché il loro studio rappresenta la *mission* dell'intero progetto di ricerca. È stata necessaria per avvalorare le ipotesi fatte in precedenza e per confermare i risultati ottenuti. Di fatti nonostante attraverso il metodo Monte Carlo sia stata tenuta in considerazione ogni possibile fonte di variabilità dei dati, sono stati confermati i risultati ottenuti in precedenza (lo scenario

di riscaldamento domestico mediante stufa innovativa a legna presenta un impatto maggiore dello scenario a pellet) attestando una buona robustezza del modello creato ed una buona affidabilità dei risultati ottenuti

In conclusione il presente lavoro di Tesi ha fornito degli ottimi spunti per proseguire l'indagine prevista nel progetto L.EN.S. sull'impiego di biomassa, sottolineando in parte alcune criticità associate agli scenari con biocombustibili. L'analisi eseguita mediante la metodologia LCA ha permesso di focalizzare l'attenzione sulle categorie più critiche da osservate per entrambi gli scenari, confermando che le preoccupazioni dei decisori politici non siano infondate. Tuttavia è bene essere prudenti nel trarre conclusioni definitive, poiché per ottenere risultati più attendibili è opportuno affiancare il presente studio con ulteriori campagne di monitoraggio ambientale, in grado di fornire dati primari per l'analisi LCA, e parallelamente verificare i possibili danni causati dalle emissioni di sostanze nocive attraverso delle analisi epidemiologiche, così come previsto nell'ambito del progetto LENS. Solo seguendo un simile iter sarà possibile avere un quadro di informazioni più dettagliato e completo, necessario per individuare il ruolo che dovrà essere associato all'utilizzo di biomasse per garantire il conseguimento degli obiettivi di qualità ambientale previsti dalla direttiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo.

Poiché le biomasse appartengono alla categoria "fonti di energia alternativa", è bene considerare che sarà indispensabile un loro impiego sempre crescente per garantire una diminuzione dei livelli di gas climalteranti emessi in atmosfera, ma sarebbe opportuno verificare a priori l'impatto di tali strumenti sulla salute umana, in modo da prediligere i combustibili e le tecniche di riscaldamento meno impattanti, come ad esempio le stufe a pellet. Pertanto parallelamente alla fase di valutazione degli impatti, sarebbe opportuno eseguire una campagna di sensibilizzazione, con la quale informare i cittadini dei vantaggi, delle modalità e dei rischi che possono correre a causa dell'impiego di biomassa come combustibile.

Come mostra il grafico a radar riportato in Figura 59 gli sforzi da compiere per convincere la popolazione all'acquisto di strumenti "più ecologici", nella sola regione Lombardia, è estremamente rilevante. Di fatti solo il 20,3% sarebbe disposto a considerare l'ipotesi di una sostituzione e tra questi solo il 5% si muoverebbe certamente per farlo. Ovviamente per garantire l'ottenimento di questi risultati sarebbe necessario coinvolgere anche i media, gli enti locali e governativi, oltre che incentivare lo sviluppo e la diffusione sempre crescente di studi di impatto ambientale, che possono fungere da mezzo di supporto del consumatore,

aiutandolo ad effettuare scelte più mirate al momento dell'acquisto e/o della sostituzione del vecchio apparecchio.

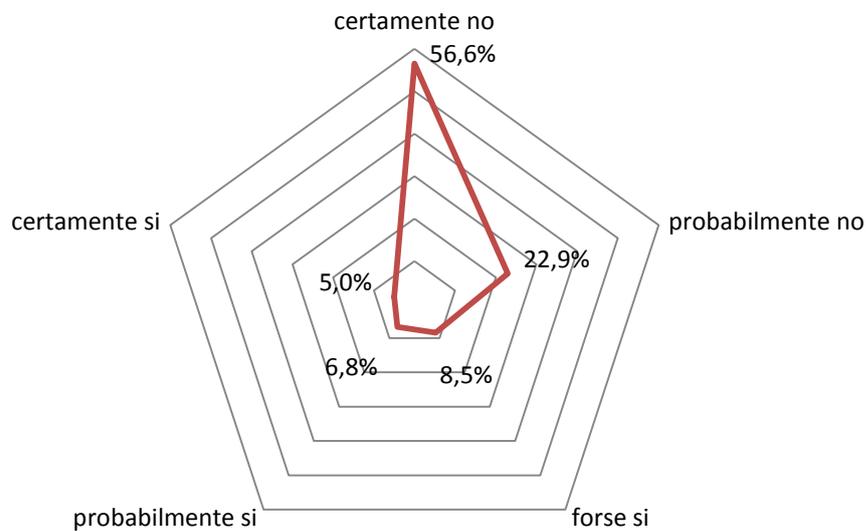


Figura 59 Propensione acquisto strumenti più ecologici nella regione Lombardia [59]

Personalmente, credo che solo attraverso un investimento fiducioso nei giovani e nella ricerca si possa migliorare costantemente la qualità della vita e dell'ecosistema nel quale viviamo; solo attraverso un continuo ed aperto dialogo tra scienza, tecnologia, politica e popolazione si potranno conseguire risultati effettivi.

14. BIBLIOGRAFIA

- [1] Acerbi G. (2009), *Dossier Pompe di calore-Progetto RES & RUE Dissemination*.
- [2] AIEL (2011), *La combustione del legno- fattori di emissione e quadro normativo*.
- [3] AIEL (2011), European Pellet Council, *La nuova certificazione del pellet EN plus*.
- [4] Ardente F., Beccali G., Cellura M. , Lo Brano V. (2005), *Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances*, ELSEVIER, 109-130. (Disponibile nella banca dati della Biblioteca Università degli Studi di Bologna)
- [5] Ardente F., Beccali G., Cellura M. , Lo Brano V. (2005), *Life cycle assessment of a solar thermal collector*, ELSEVIER, 1031-1054..
- [6] Armaroli N., Balzani V. (2004), *Energia oggi e domani: prospettive, sfide, speranze*, Bonomia University Press.
- [7] Armaroli N., Balzani V. (2008), *Energia per l'astronave Terra*, Zanichelli.
- [8] Armaroli N., Balzani V. (2011), *Energy for Sustainable World-From the Oil Age to a Sun-Powered Future*, WILEY-VCH.
- [9] ARPA Lombardia (2011). Available in:
<http://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/InemarDatiWeb/Mappe>
- [10] Baldo G.L, Marino M, Rossi S (2008), *Analisi del Ciclo di Vita LCA*, nuova edizione aggiornata, Perugia, Edizioni Ambiente.
- [11] Battisti R., Corrado A. (2005), *Enviromental assesment of solar thermal collectors with integrated water storage*, ELSEVIER, 1295-1030.
- [12] BAXI (2009), *Baxi Wall Hung Condensing Boiler LUNA 4-EPD*.
- [13] Beretta Holding S.p.A.(2011), *Schede tecniche caldaie*.
- [14] Bonoli A. (2007), *Applicazione di una metodologia LCA (Life Cycle Assessment) per una valutazione costi/benefici di carattere ambientale nell'impiego di biomasse per la produzione energetica nell'Appennino tosco emiliano*.

- [15] Breedveld L., Tremonti M., Padovan G., Bosio S., Corsini M. (2008), *LCA di caldaie a condensazione nell'ambito delle direttive EuP*.
- [16] British Petroleum, *Statistical Review of World 2011*. Available in:
<http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>.
- [17] Caserini S., Livio S., Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L. (2010), *LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy)*, ELSEVIER, 474-482.
- [18] Cernuschi, Gigliano, Consonni - LEAP (2010), *Emissioni di polveri fini e ultrafini da impianti di combustione*.
- [19] Clark J., Macquarrie D. (2002), *Handbook of Green Chemistry & Technology*, Oxford (UK), Blackwell Publishing.
- [20] CNES, Commissione Nazionale per l'Energia Solare, (2007), *Rapporto preliminare sullo stato attuale del solare termico nazionale*.
- [21] Cocchi M., Capaccioli S., Vivarelli F., *IEA Bioenergy Task 40 - Sustainable International Bioenergy Trade- Country Report 2009 Italy*. Available in:
<http://www.bioenergytrade.org/downloads/italycrtask40.pdf>.
- [22] Colucci M., D'Antonio C., D'Antonio P. e Evangelista C. (2010), *La filiera città-legno-energia. Nuove forme di gestione ecosostenibile del verde urbano*.
- [23] D.lgs. 3 Aprile 2006, n.152 *Norme in materia ambientale*, *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006.
- [24] D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412, Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4 della legge 9 gennaio 1991, n.10.
- [25] Dentice d'Accadia M., Sasso M., Sibilio S., Vanoli R. (1999), *Applicazioni di energetica -Introduzione all'analisi tecnico-economica di sistemi per il risparmio energetico*, Liguori Editore.

- [26] Direttiva 92/42/CEE Concernente i requisiti di rendimento per le nuove caldaie ad acqua alimentate con combustibili liquidi o gassosi.
- [27] ENEA (2010), *Dossier fonti rinnovabili – competenze e infrastrutture ENEA*.
- [28] ENEA (2010), *Rapporto energia e ambiente - analisi scenari 2009*.
- [29] ENEA (2009), *Dossier-Usi termici delle fonti rinnovabili*.
- [30] EnerBuilding.eu, Adiconsum (2007), *Il risparmio energetico negli edifici condominiali*.
- [31] EnerBuilding.eu, Adiconsum (2007), *Il risparmio energetico nelle villette*.
- [32] EnerBuilding.eu, Adiconsum (2007), *L'efficienza energetica nelle nuove costruzioni*.
- [33] EnerBuilding.eu, Adiconsum (2007), *L'uso razionale dell'energia negli edifici pubblici*.
- [34] European Commission DG TREN (2009), Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs(II), *Lot 15- Solid fuel small combustions installations- Task 5: Base Cases*.
- [35] European Commission DG TREN (2009), Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs(II), *Lot 15- Solid fuel small combustions installations- Task 6: Technical analysis of BATs*.
- [36] European Pellet Council (2011), *Handbook for the Certification of Wood Pellets for Heating Purpose Based on EN 14961-2*.
- [37] Forsén M. (SVEP 2005), *Heat Pumps-Tecnology and Enviromental Impact Part I*.
- [38] Francescato V., Antonini E., Zuccoli Bergomi L. (2009) *Manuale pratico: Legna e cippato–Produzione, requisiti qualitativi e compravendita*.
- [39] Gallo V. (2010), *Sostenibilità economica e prospettiva degli impianti a biomassa*. Fiper – Federazione Italiana Produttori di Energia da Fonti Rinnovabili.
- [40] Garcia-Maraver A., Popov V. e Zamorano M. (2011), *A review of European standards for pellet quality*, Elsevier, 3537-3540.
- [41] Gentilini M. (1992), *Elementi di energetica*, Progetto Leonardo Bologna.

- [42] Goedkoop M, Heijungs, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, van Zelm R (2009) *ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*, First edition. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Netherlands.
- [43] Goedkoop M., De Schryver A., Oele M. (PRé consultants 2008), *Intoduction into LCA with SimaPro7*.
- [44] Gore AI (2010), *La Scelta*, Rizzoli.
- [45] Hansen M.T., Rosentoft Jein A. (Pelletsatlas 2009), *Manuale italiano per la combustione di pellet da legno*.
- [46] ICARO (2008), *Catalogo solare termico* .
- [47] Ilarioni L. (2007), *Il legno come combustibile: caratteristiche energetiche e di prodotto* SILVAE.
- [48] INCF - Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio – Corpo Forestale dello Stato (2008) Inventari Forestali. Available in: <http://www.sian.it/inventarioforestale/jsp/home.jsp>.
- [49] ISTAT (2004) Edifici ed abitazioni - Censimento 2001. Dati definitivi Available in: http://www.istat.it/salastampa/comunicati/non_calendario/20041209_02/testointegrale.pdf
- [50] ISTAT (2008), *Utilizzazioni legnose forestali per tipo di bosco e per destinazione (in metri cubi) Dettaglio per provincia, anno 2008*. Tavole. Available in: <http://www.istat.it/>.
- [51] Johnson E.P. (2010), *Air-source heat pump carbon footprints: HFC impacts and comparison to other heat sources*, ELSEVIER, 1369-1381.
- [52] Junginger M., van Dam J., Alakangas E., Virkkunen M., Vesterinen P., Veijonen K. (2010) *EuBionNet3 - Solutions for biomass fuel market barriers and raw material availability - IEE/07/777/SI2.499477. Solutions to overcome barriers in bioenergy makets in Europe – D2.2. Resource, use and market analysis – VTT-R-01700-10*. Available in: <http://www.eubionet.net/default.asp?SivuID=25484>.

- [53] Kemma R., van Elburg M., Li W., van Holsteijn R. (VHK 2005), *Methodology Study Eco-design of Energy-using Products, Final Report- Gas & Oil-fired CH boilers.*
- [54] Kemma, R.B.J. et al. (VHK, Delft, 1993), *MilieuMaten Nefit Turbo 22.*
- [55] Manahan S.E. (1995), *Chimica dell'Ambiente*, Piccin.
- [56] Merloni termosanitari (2011), *Manuale Tecnico Solare Termico.*
- [57] Nibbi L. (2009) EuBionNet3 - *Solutions for biomass fuel market barriers and raw material availability - IEE/07/777/SI2.499477. WP2 - Biomass fuel trade in Europe - Country report: Italy.* Available in: <http://www.eubionet.net/default.asp?SivuID=25484>.
- [58] Passarini F. (2010), *Dispense didattiche del corso Tecnologie di certificazione ambientale-Chimica Industriale LM.*
- [59] Pastorello C., Dilara P. (2008), *Estimation of residential wood combustion in the Lombardy Region*, redatto per European Commission-JRC (Joint Research Centre).
- [60] Pauschinger T., Ménard M., Schulz M. (Ambiente Italia 2003) *Impianti solari termici Manuale per la progettazione e costruzione.*
- [61] Pré Consultant (2008), *Tutorial*, Product Ecology Consultants.
- [62] Probio CTI (2004), *Analisi tecnico economica per una filiera di produzione di pellet da legno.*
- [63] Regione Lombardia (2004), Comitato Termotecnico Italiano, BIOCEN-Gestione e valorizzazione delle ceneri di combustione nella filiera Legno-Energia.
- [64] Regione Lombardia (2009), *Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia.*
- [65] Regione Lombardia, *Deliberazione n° VIII/007635* 11 Luglio 2008.
- [66] Regione Lombardia, *l.r. 11 Dicembre 2006, n. 24.*
- [67] Sarembo S. (2009), *Wood ash dilemma-reduced quality due to poor combustion performance*, ELSEVIER, 1212-1220.
- [68] Setti L. (2009) *Dispense didattiche Cdl TECHIAR Recupero energetico.*

- [69] Setti L., Balzani V. (2011), *Road Map towards an integrated energy management system in Italy*, Rend. Fis. Acc. Lincei, 22:55–64
- [70] The Bioenergy International *ITALIA* - 3-settembre 2010.
- [71] UNI (2010), *Biocombustibili solidi Specifiche e classificazione del combustibile Parte 1: Requisiti generali UNI EN 14961-1*.
- [72] UNI (2011), *Biocombustibili solidi Specifiche e classificazione del combustibile Parte 5: Legna da ardere per uso non industriale UNI EN 14961-5*.
- [73] Vivarelli F., Ghezzi L. (Pelletsatlas 2009), *Development and promotion of a transparent European Pellets Market Creation of a European real-time Pellets Atlas*.
- [74] World Resources Institute, *EarthTrends-The Environmental Information Portal*. Available in: http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.php?theme=6.
- [75] WWF Italia (2009), *Cambiamenti climatici , ambiente ed energia- linee guida per una strategia nazionale di mitigazione ed adattamento*.