



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA
Sede distaccata presso il Polo di Pordenone

L'ENERGIA TERMICA NELL'INDUSTRIA DEL MOBILE-ARREDO

Life Cycle Assessment del processo di produzione
da combustibili fossili e da scarti legnosi trattati autoprodotti



Davide Zambon – Elio Padoano – Dario Pozzetto
Paolo Badin – Vigilio Piccolotto

ellerani|editore

ISBN 978-88-85339-20-0

ellerani|editore

FEDERLEGNO-ARREDO



Unione Industriali
Pordenone

PORDENONE
ENERGIA

In collaborazione con:



CONFINDUSTRIA PESARO URBINO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA
Sede distaccata presso il Polo di Pordenone

L'ENERGIA TERMICA NELL'INDUSTRIA DEL MOBILE-ARREDO

**Life Cycle Assessment del processo di produzione
da combustibili fossili e da scarti legnosi trattati autoprodotti**

Davide Zambon – Elio Padoano – Dario Pozzetto

Dipartimento di Ingegneria Meccanica
Sede distaccata presso il Polo di Pordenone
Università degli Studi di Trieste

Paolo Badin – Vigilio Piccolotto

Unione degli Industriali della Provincia di Pordenone

Sommario

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Prefazione | 7 |
| Relazione di sintesi | 9 |
| | |
| 1. La produzione di energia termica nella filiera produttiva delle aziende del mobile dell'Alto Livenza..... | 21 |
| 2. Gli impianti termici e il processo di combustione | 27 |
| 3. Life Cycle Assessment degli impianti termici alimentati da diversi combustibili..... | 39 |
| 3.1 Goal and Scope Definition..... | 40 |
| 3.2 Inventory Analysis | 46 |
| 3.2.1 Sistema di combustione a scarto legnoso trattato | 46 |
| 3.2.2 Sistema di combustione a gasolio..... | 49 |
| 3.2.3 Sistema di combustione a BTZ..... | 50 |
| 3.2.4 Sistema di combustione a metano..... | 52 |
| 3.3 Impact Assessment..... | 53 |
| 3.3.1 Il metodo CML 2001 | 54 |
| 3.3.2 Il metodo Eco-Indicator '99..... | 62 |
| 3.4 Interpretation..... | 71 |
| 4. Conclusioni | 79 |
| | |
| Bibliografia | 81 |

Prefazione

Il periodo a cavallo degli anni '80 e '90 ha visto da un lato l'introduzione di cospicui contributi e incentivi economici per la conversione degli impianti termici industriali alimentati da combustibile fossile e, dall'altro, l'avvento di norme comunitarie sui rifiuti e il loro recepimento nell'ordinamento legislativo italiano (D.Lgs. n. 22/97 e D.M. 05.02.1998). Si è così verificata, nel settore industriale del mobile-arredo, una drastica inversione di tendenza nell'utilizzo dei residui trattati della lavorazione del legno per la produzione di energia termica. Questo fatto si è acuito anche a causa di alcuni limiti restrittivi sulle emissioni in atmosfera, in particolare CO e NOx, (D.M. 05.02.1998) rispetto a quelli desunti dalle norme precedenti (D.M. 12.07.1990) e a quelli imposti ai combustibili fossili tradizionali.

Proprio questa criticità ha portato ad una graduale dismissione dei generatori di calore alimentati a scarto legnoso a favore di quelli a combustibile non rinnovabile. Infatti dai dati rilevati da uno studio [AA98] si denota che nel 1997 il 59% del fabbisogno termico nel settore legno-arredo era soddisfatto mediante scarti legnosi, contro un 39% rilevato nel 2000 [Ca02], a favore di un sempre maggiore utilizzo di combustibili fossili.

Lo studio che viene presentato ha lo scopo di confrontare, mediante l'utilizzo della metodologia del Life Cycle Assessment, i potenziali impatti ambientali globali dovuti alla produzione dell'energia termica necessaria ad aziende del settore mobile-arredo utilizzando diversi combustibili (scarto legnoso trattato, BTZ, gasolio e metano).

È in questo ambito che il gruppo di lavoro ha inteso raccogliere in questo testo i risultati della ricerca "Confronto di due possibili utilizzi degli scarti legnosi trattati della lavorazione del legno mediante la metodologia del Life Cycle Assessment", finanziata da Federlegno-Arredo quale logica conseguenza ed esigenza di approfondimento nel contesto del progetto di divulgazione e registrazione EMAS nel Distretto del mobile di Pordenone. Per le sue peculiarità e per le sue articolazioni produttive, le attività che si svolgono in questo Distretto possono ben rappresentare, in scala ridotta, l'intera filiera produttiva del mobile italiano.

Un ringraziamento degli autori va a Roberto Ferrarato, Fulvio Grassi e Lucia Morgese, che con dedizione e scrupolosità hanno fornito supporto alla gestione amministrativa del

progetto, al prof. Mauro Reini che ha consentito l'uso del programma EES e ha portato il suo contributo in alcune fasi di elaborazione del lavoro, e al prof. Franco Di Valentin che ha offerto importanti suggerimenti nel corso della ricerca. Un sentito ringraziamento va inoltre al Consorzio Pordenone Energia che, nella persona del suo Presidente dott. Dario Rossi, ha consentito la realizzazione di questo testo e al Distretto del Mobile del Livenza (oggi ASDI) che ha fornito parte dei dati e del materiale bibliografico necessario alle fasi iniziali dello studio.

Gli autori

Pordenone, settembre 2007

Relazione di sintesi

Nel settore industriale del mobile-arredo si è verificata una drastica inversione di tendenza nell'utilizzo dei residui trattati della lavorazione del legno per la produzione di energia termica. Questo fatto si è acuito anche a causa di alcuni limiti restrittivi sulle emissioni in atmosfera, in particolare CO e NOx, (D.M. 05.02.1998) rispetto a quelli desunti dalle norme precedenti (D.M. 12.07.1990) e a quelli imposti ai combustibili fossili tradizionali.

Proprio questa criticità ha portato ad una graduale dismissione dei generatori di calore alimentati a scarto legnoso a favore di quelli a combustibile non rinnovabile.

Lo studio che viene presentato ha lo scopo di confrontare, mediante l'utilizzo della metodologia del Life Cycle Assessment, i potenziali impatti ambientali globali dovuti alla produzione dell'energia termica necessaria ad aziende del settore mobile-arredo utilizzando diversi combustibili (scarto legnoso trattato, BTZ, gasolio e metano).

Come caso esemplificativo viene presa in considerazione la filiera produttiva del Distretto del Mobile di Pordenone, esemplificativa dell'industria italiana del mobile, dove si stanno diffondendo i sistemi di gestione ambientale ed è stato assegnato l'attestato EMAS al Distretto medesimo.

Life Cycle Assessment degli impianti termici alimentati da diversi combustibili

Il Life Cycle Assessment – LCA – è un “processo oggettivo di valutazione dei carichi connesso con un prodotto, un processo od un'attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dell'energia e dei materiali usati o dei rifiuti rilasciati nell'ambiente, per valutare l'impatto di questi usi di energia e di materiali e dei rilasci nell'ambiente e per valutare e realizzare le opportunità di miglioramento ambientale. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, comprendendo l'estrazione ed il

trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso e il riciclo e lo smaltimento finale". A livello internazionale la metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO 14040 e 14044 del 2006 in base alle quali uno studio di vita prevede le seguenti fasi:

- *goal e scope definition*, che prevede la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi;
- *inventory analysis*, che prevede la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema, quantificando i flussi di materia e di energia in entrata ed in uscita dalle varie fasi del ciclo di vita;
- *impact assessment*, che prevede la valutazione del potenziale impatto ambientale correlato agli input ed output determinati nella fase precedente di inventario;
- *interpretation*, che prevede l'interpretazione dei risultati che si concretizza nell'esposizione delle valutazioni raggiunte e nella valutazione dell'affidabilità dei risultati.

Il ciclo di vita di un prodotto, processo o attività può essere suddiviso in alcune fasi principali (figura A):

- estrazione e trasformazione delle materie prime;
- produzione e assemblaggio;
- utilizzo del prodotto;
- fine vita del prodotto.

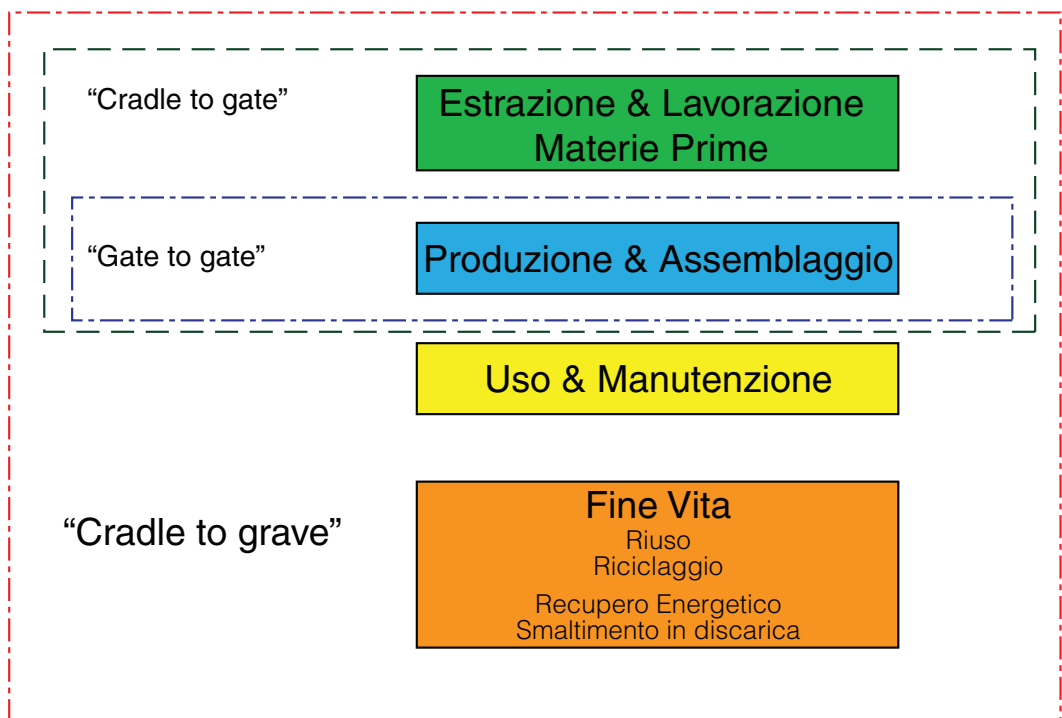


Figura A. Fasi del ciclo di vita di un prodotto

Obiettivo - Goal and scope definition

Le motivazioni che hanno portato alla realizzazione di questo lavoro sono:

- valutare l'impatto ambientale globale conseguente alla produzione di energia termica da impianti alimentati da quattro diversi combustibili (scarti della lavorazione del legno trattati, BTZ, gasolio e metano). Viene tenuta in considerazione anche l'attività di trasporto degli scarti di legno trattato, non utilizzati per la produzione di energia termica, verso le aziende produttrici di pannelli truciolati e quella di reintegro dello scarto legnoso bruciato con altro legno da parte delle aziende produttrici degli stessi pannelli, nonché lo smaltimento di una parte degli scarti legnosi e delle ceneri prodotte dal processo di combustione in discariche controllate;
- effettuare il confronto dell'impatto ambientale globale dei quattro sistemi considerati:
 - a) sistema di combustione a scarto legnoso trattato;
 - b) sistema di combustione a BTZ;
 - c) sistema di combustione a gasolio;
 - d) sistema di combustione a metano;

Analisi dei processi elementari - Inventory Analysis

Nel corso di questa fase si sono analizzati i processi elementari di ogni sistema e, in particolare, sono stati identificati e quantificati i flussi di materia e di energia. Il risultato finale è la redazione della tabella di inventario (*inventory table*), ottenuta attraverso un accurato reperimento dei dati (vedi sottostante tabella).

| SISTEMI DI GENERAZIONE DI ENERGIA TERMICA ALIMENTATI A DIVERSI COMBUSTIBILI | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| SOTTO-SISTEMI | SCARTO LEGNOSO TRATTATO | BTZ | GASOLIO | METANO |
| Approvvigionamento dei combustibili e di produzione dell'energia termica | Preparazione del materiale | Estrazione, raffinazione e trasporto | Estrazione, raffinazione e trasporto | Estrazione, raffinazione e trasporto |
| | Stoccaggio | Stoccaggio in serbatoi metallici | Stoccaggio in serbatoi metallici | Sistema alimentazione del generatore termico |
| | Sistema alimentazione del generatore termico | Sistema alimentazione del generatore termico | Sistema alimentazione del generatore termico | Generatore termico |
| | Generatore termico | Generatore termico | Generatore termico | Espulsione dei prodotti della combustione |
| | Sistema raccolta delle ceneri | Espulsione dei prodotti della combustione | Espulsione dei prodotti della combustione | Produzione energia elettrica necessari al sotto-sistema |
| | Depurazione ed espulsione dei prodotti della combustione | Produzione energia elettrica necessari al sotto-sistema | Produzione energia elettrica necessari al sotto-sistema | |
| Trasporto degli scarti della lavorazione del legno dalla produzione all'industria dei pannelli e in discarica, del legno di reintegro dell'industria dei pannelli e delle ceneri di combustione alla discarica | Trasporto via gomma | Trasporto via gomma | Trasporto via gomma | Trasporto via gomma |
| Smaltimento in discarica controllata degli scarti legnosi e delle ceneri | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) |
| | Discarica controllata di seconda categoria (ex 2b) per le ceneri | | | |
| Ausiliari, complementari ai processi | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione |
| | Produzione di energia elettrica necessario al funzionamento del processo di combustione | | | |

Configurazioni dei sistemi analizzati

Valutazione degli impatti - Impact Assessment

L'*impact assessment* è la procedura di valutazione degli impatti potenziali o presenti nell'ambiente; essa consiste nel correlare i dati fisici trovati nella fase di Inventario con gli impatti ambientali in entrata ed uscita dal sistema, generati a seguito di rilasci e di consumi di risorse provocati dai processi in esame.

Gli step principali comuni ad ogni metodo sono:

- classificazione e caratterizzazione (*classification and characterization*);
- normalizzazione (*normalization*);
- valutazione o ponderazione (*evaluation*).

Nella prima fase, tutti gli impatti sono classificati a seconda degli effetti che essi hanno sull'ambiente.

Gli impatti che, ad esempio, contribuiscono all'effetto serra sono raggruppati in un'unica categoria, così come gli impatti che contribuiscono al danno sullo strato di ozono ecc..

Le categorie di aggregazione più comunemente utilizzate sono:

- consumo di risorse: rinnovabili e non rinnovabili;
- inquinamento: effetto serra, danno della fascia di ozono, tossicità per l'uomo, ecotossicità, formazione di composti ossidanti da processo fotochimico, acidificazione ed eutrofizzazione;
- degrado dell'ecosistema: uso del territorio.

Non è sufficiente sommare le quantità delle diverse sostanze raggruppate in una categoria per ottenere il valore complessivo d'impatto; alcune sostanze possono essere infatti più dannose di altre all'interno di una stessa categoria. Vengono, quindi, applicati dei coefficienti volti a conferire il giusto "peso" alle diverse sostanze. Si realizzano in tal modo degli indici di impatto ambientale (fase di caratterizzazione).

La normalizzazione dei valori di impatto, ottenuti dalla caratterizzazione delle sostanze analizzate, è fatta su base mondiale oppure europea. In questa fase non è ancora possibile fare un confronto diretto tra le diverse categorie di impatto.

Infine l'obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un unico valore numerico, l'impatto ambientale associato ad un prodotto nell'arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono moltiplicati per dei "fattori di peso" che esprimono l'importanza, intesa come critica, che viene attribuita a ciascun problema ambientale (categoria di impatto).

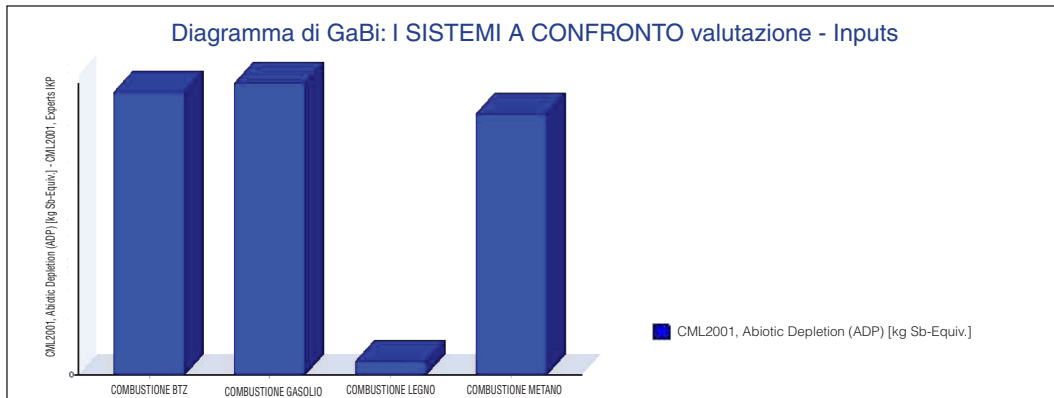
I due metodi di valutazione degli impatti adottati nel presente lavoro sono:

- CML 2001;
- Eco-Indicator '99.

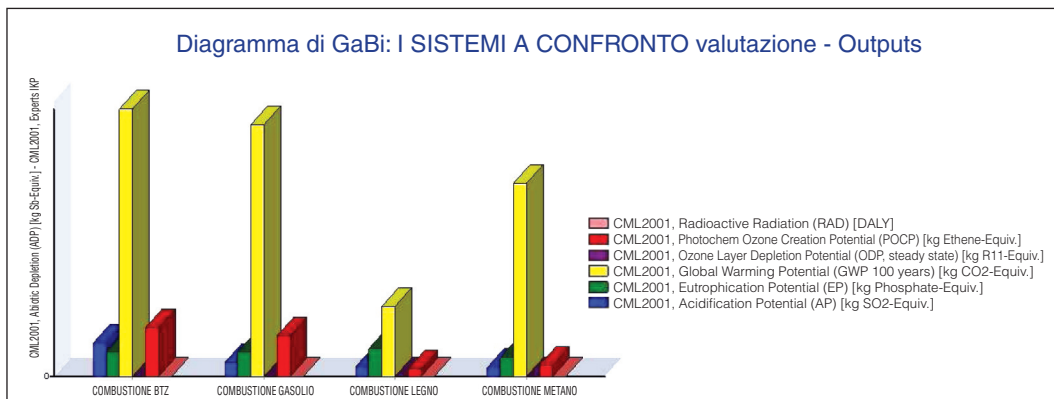
La banca dati ed il programma informatico utilizzati sono quelli del Gabi 4.

Il metodo CML 2001

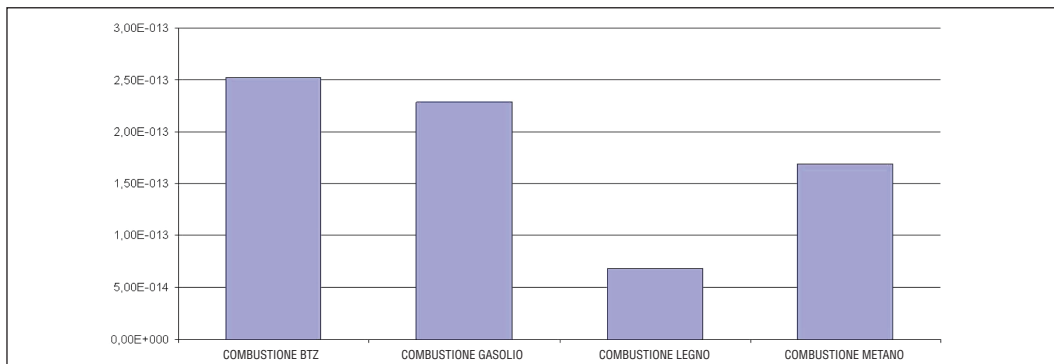
Il metodo CML 2001 è stato sviluppato dal *Centre of Environmental Science (CML)* dell'Università di Leiden, Germania.



Risultati della valutazione – impatti in entrata al sistema (CML2001)



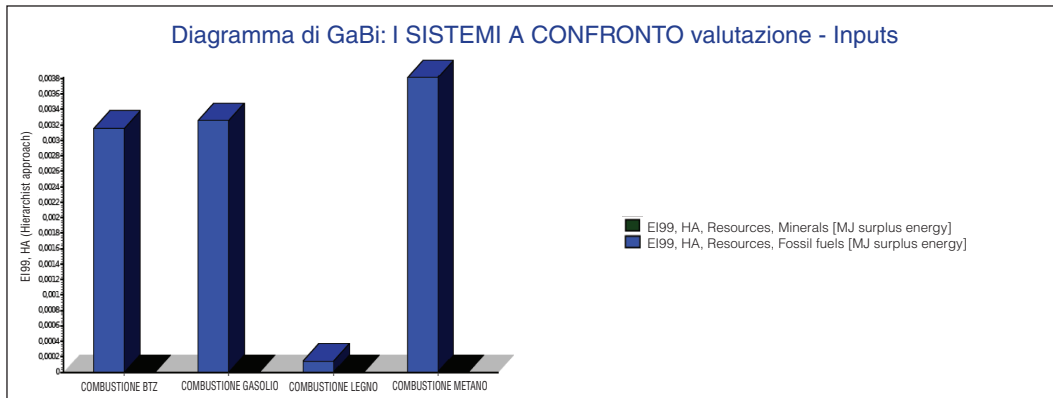
Risultati della valutazione: impatti in uscita dal sistema (emissioni, rifiuti, ecc...) (CML2001)



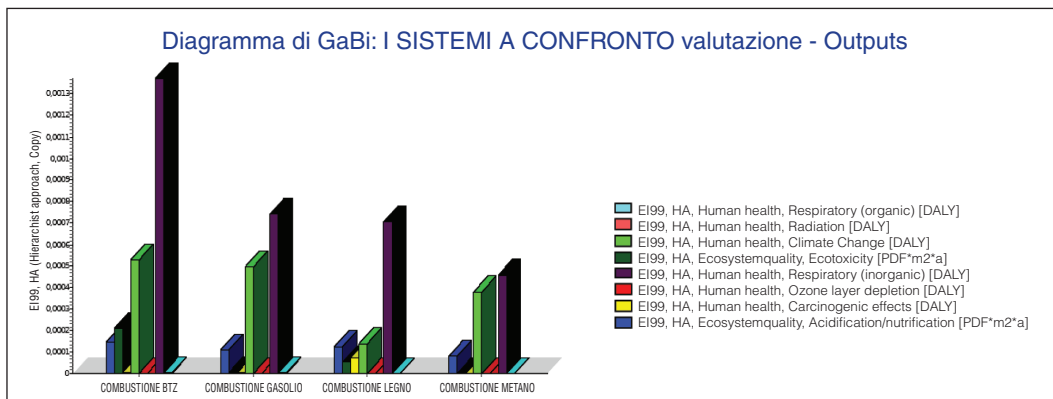
Risultati della valutazione (CML2001)

Il metodo Eco-Indicator '99

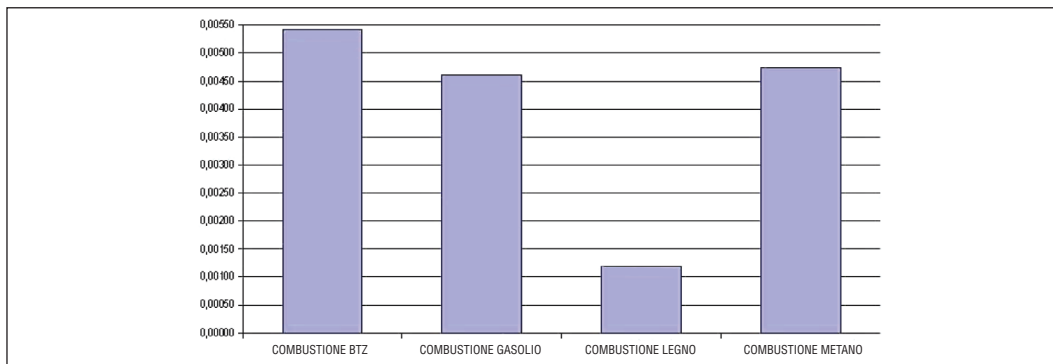
Il metodo Eco-Indicator '99 impiega alcune “funzioni di danno” (*damage function*) che definiscono la relazione esistente tra il valore d'impatto e il danno alla salute umana o all'ecosistema.



Risultati della valutazione: impatti in entrata (Eco-Indicator '99)



Risultati della valutazione (Eco-Indicator '99)



Risultati della valutazione: Impatti in uscita dal sistema (emissioni, rifiuti, ecc...) (Eco-Indicator '99)

Interpretazione dei risultati - Interpretation

Verifica degli impatti con la variazione sperimentale dei parametri di emissione

Per analizzare l'incidenza di alcuni parametri delle emissioni sui risultati, si sono eseguite analisi di scenario facendo variare, in ciascuna di esse, i valori di un parametro prescelto e lasciando invariate le altre condizioni di funzionamento del sistema.

A tale riguardo si sono variati da 200 a 500 mg/Nm³ i livelli di emissione degli NOx - ossidi di azoto - ammessi dal D.M. 05.02.1998 per il processo di combustione degli scarti legnosi trattati. I risultati relativi ai flussi dei quattro sistemi sono stati riportati nelle figure 46 e 47 utilizzando il metodo CML2001 e Eco-Indicator '99. Dalle stesse si nota che man mano che aumentano le emissioni degli ossidi di azoto, aumentano naturalmente anche gli impatti ambientali del sistema di combustione a scarto legnoso trattato. A livello di flussi totali (input + output), però, sebbene siano aumentati gli impatti ambientali, il sistema di combustione degli scarti legnosi trattati risulta più conveniente degli altri sistemi

Valutazione/Normalizzazione: CML2001, Experts IKP (Southern Europe)/CML2001, Europe

| Sistema | Scenario 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Scenario 12 |
|--------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| NOx | 200,00 | 227,27 | 254,55 | 281,82 | 309,09 | 336,36 | 363,64 | 390,91 | 418,18 | 445,45 | 472,73 | 500,00 |
| Flussi ingresso + uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 5,84E-14 | 5,97E-14 | 6,10E-14 | 6,23E-14 | 6,36E-14 | 6,49E-14 | 6,62E-14 | 6,75E-14 | 6,88E-14 | 7,01E-14 | 7,14E-14 | 7,27E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 |
| Flussi uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 5,64E-14 | 5,77E-14 | 5,90E-14 | 6,03E-14 | 6,16E-14 | 6,29E-14 | 6,42E-14 | 6,55E-14 | 6,68E-14 | 6,81E-14 | 6,94E-14 | 7,07E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 |

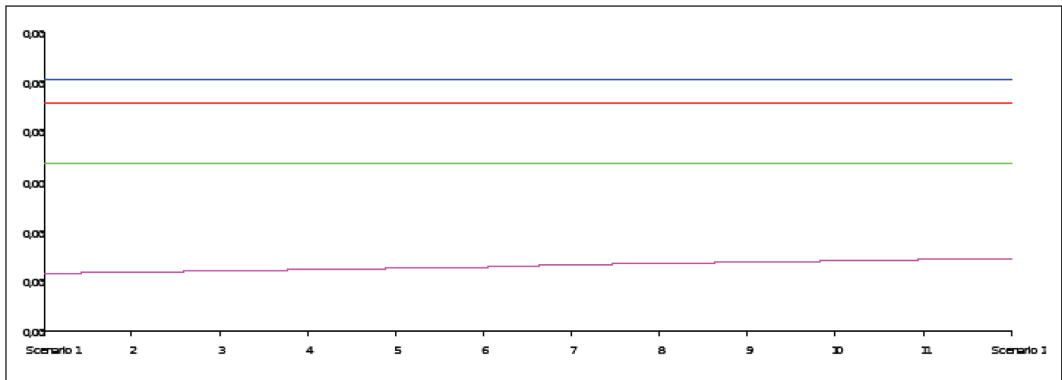
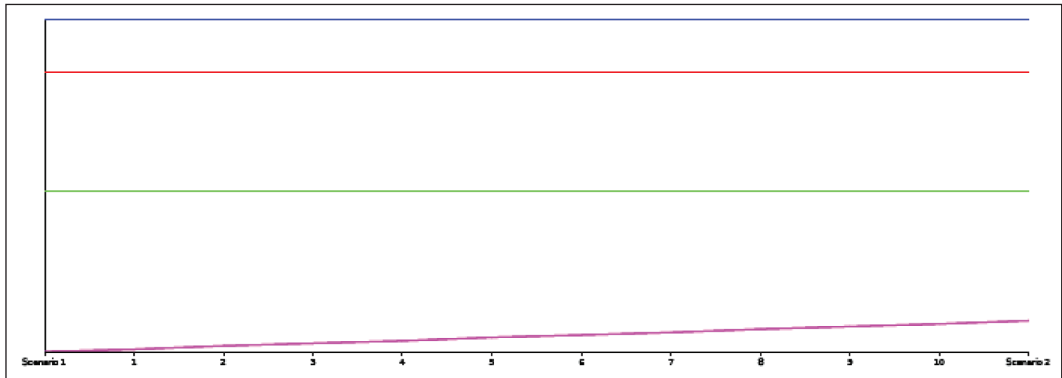


Figura 46. Variazione NOx: flussi in uscita e totali (CML2001)

| Valutazione/Normalizzazione: E199, HA (Hierarchist approach) | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| Sistema | Scenario 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Scenario 12 |
| NOx | 200,00 | 227,27 | 254,55 | 281,82 | 309,09 | 336,36 | 363,64 | 390,91 | 418,18 | 445,45 | 472,73 | 500,00 |
| Flussi ingresso + uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 0,00090 | 0,00095 | 0,00099 | 0,00104 | 0,00108 | 0,00113 | 0,00117 | 0,00122 | 0,00126 | 0,00131 | 0,00135 | 0,00140 |
| COMBUSTIONE METANO | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 |
| Flussi uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 0,00076 | 0,00080 | 0,00085 | 0,00089 | 0,00094 | 0,00098 | 0,00103 | 0,00107 | 0,00112 | 0,00116 | 0,00121 | 0,00125 |
| COMBUSTIONE METANO | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 |

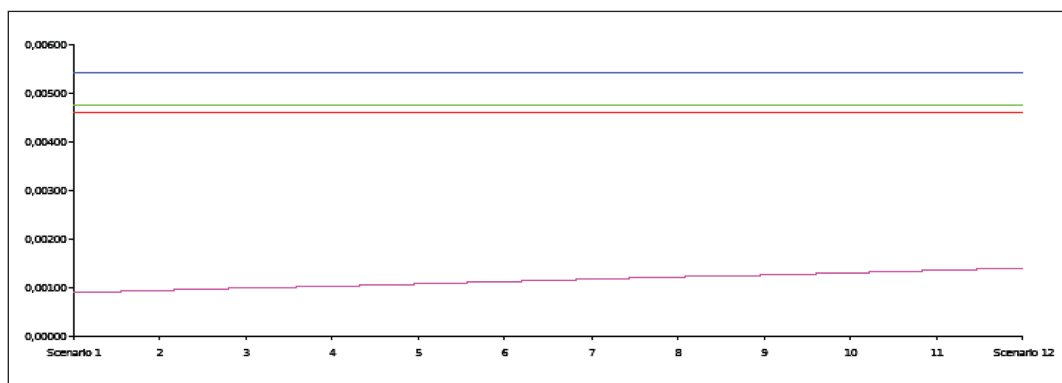
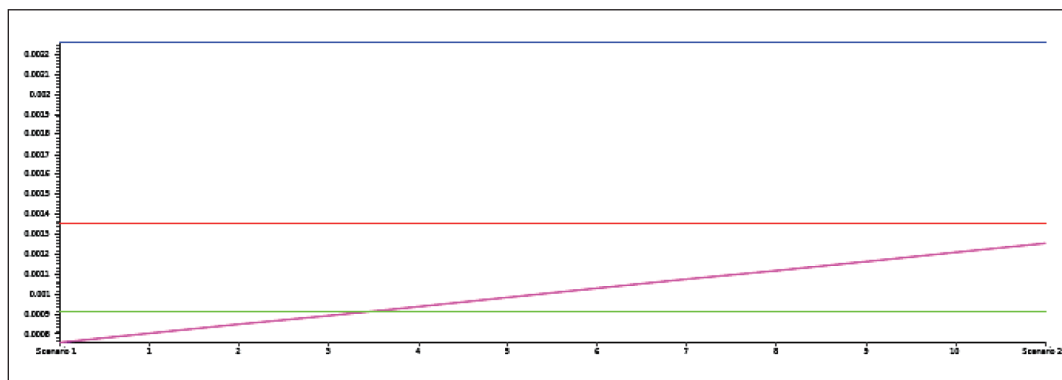


Figura 47. Variazione NOx: flussi in uscita e totali (Eco-Indicator '99)

Per una seconda analisi di scenario, si sono variati da 100 a 500 mg/Nm³ i limiti di emissione del CO -monossido di carbonio- ammessi dal D.M. 05.02.1998 per il processo di combustione degli scarti legnosi trattati. I dati relativi ai flussi dei quattro sistemi sono riportati in figura 48 per il metodo CML2001. Il metodo Eco-Indicator '99 (*Hierarchist approach*) non considera la CO come sostanza pericolosa e quindi non la conteggia.

Come si nota dal grafico, all'aumentare delle emissioni di monossido di carbonio aumentano naturalmente anche gli impatti ambientali del sistema di combustione a scarto legnoso trattato. A livello di flussi, però, sebbene si siano aumentati gli impatti ambientali, il sistema di combustione degli scarti legnosi trattati risulta sempre più conveniente degli altri sistemi.

| Valutazione/Normalizzazione: CML2001, Experts IKP (Southern Europe)/CML2001, Europe | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| Sistema | Scenario 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Scenario 12 |
| CO | 100,00 | 136,36 | 172,73 | 209,09 | 245,45 | 281,82 | 318,18 | 354,55 | 390,91 | 427,27 | 463,64 | 500,00 |
| Flussi ingresso + uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 6,79E-14 | 6,81E-14 | 6,83E-14 | 6,84E-14 | 6,86E-14 | 6,87E-14 | 6,89E-14 | 6,91E-14 | 6,92E-14 | 6,94E-14 | 6,95E-14 | 6,97E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 |
| Flussi uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 6,59E-14 | 6,61E-14 | 6,63E-14 | 6,64E-14 | 6,66E-14 | 6,67E-14 | 6,69E-14 | 6,70E-14 | 6,72E-14 | 6,74E-14 | 6,75E-14 | 6,77E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 |

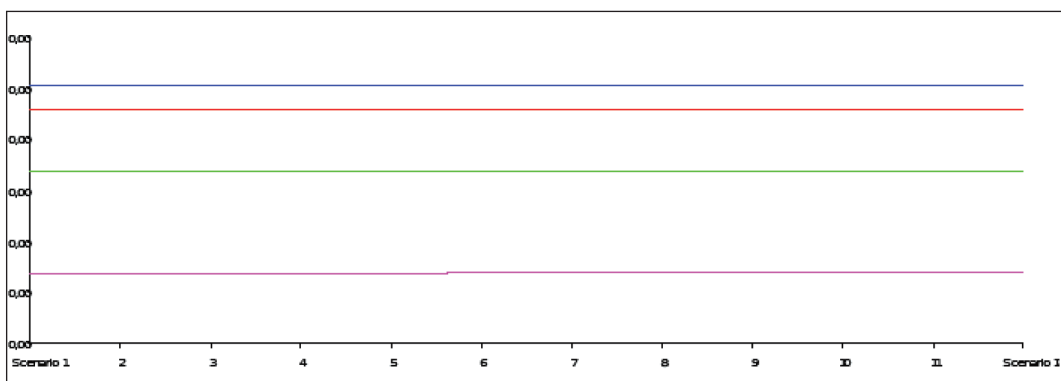
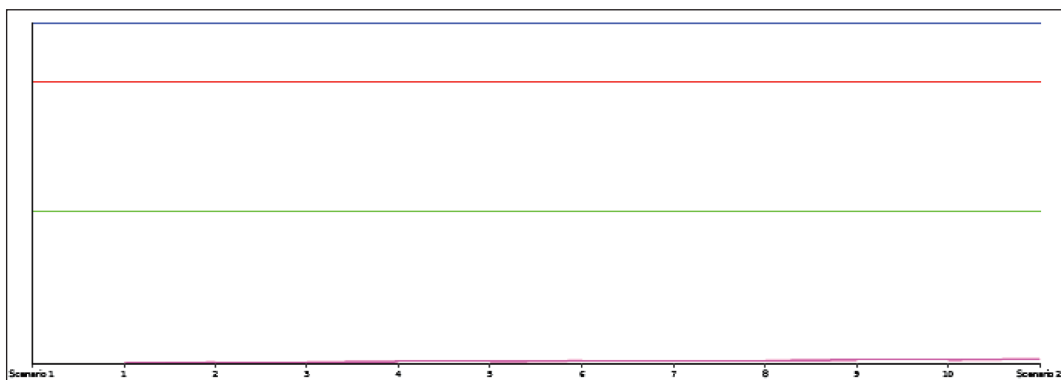


Figura 48. Variazione CO: flussi in uscita e totali (CML 2001)

Conclusioni

Lo studio che è stato sviluppato nella presente ricerca ha avuto lo scopo di confrontare i potenziali impatti ambientali globali dovuti alla produzione di energia termica necessaria ad unità produttive del settore del mobile-arredo italiano impiegando differenti combustibili: lo scarto legnoso trattato, inteso come materiale di recupero, e quelli di origine fossile quali BTZ, gasolio e metano. Si è effettuato il Life Cycle Assessment di questi quattro processi e, in particolare, si sono confrontati gli impatti ambientali globali ottenuti partendo dal presupposto di produrre la stessa quantità di energia termica – 1 MJ – bruciando rispettivamente scarti legnosi trattati, gasolio, olio combustibile fluido BTZ e metano, e dal presupposto di mantenere la stessa quantità di materiale legnoso in input nel processo di produzione del pannello truciolare integrando con altra fonte la quantità di scarto avviato a combustione e pesandone gli impatti.

I processi utilizzati per la valutazione dell'impatto con il software Gabi4 sono presenti nel database dello stesso, ad eccezione del processo "energia termica da scarto legnoso trattato" che è stato appositamente creato in base a solide e accreditate fonti di letteratura.

Dai risultati ottenuti emerge che il sistema di combustione a scarto legnoso trattato, adottando i limiti di emissione attualmente vigenti per ciascuno dei combustibili e per il legno trattato, ha minor impatto ambientale rispetto a quelli alimentati a combustibile fossile.

La caratteristica generale per entrambe le metodologie impiegate per la valutazione, è che le risposte per le categorie di impatto, individuate per la valutazione dei processi conformemente alla logica del LCA, tengono conto degli effetti rilevabili su scala globale.

Lo studio pone in evidenza che per la combustione del legno trattato di cui al punto 6 allegato 2 suballegato 1 del D.M. 05.02.1998 potrebbero essere concessi maggiori limiti alle emissioni di ossidi di azoto NO_x ed ossido di carbonio CO senza apprezzabili aumenti di impatto globale rispetto ai combustibili fossili per i quali, a parità di taglia di impianto di combustione, sono fissati ben più elevati limiti per i medesimi inquinanti o in alcuni casi tali limiti non sono stati individuati dal legislatore.

1. La produzione di energia termica nella filiera produttiva delle aziende del mobile dell'Alto Livenza

Il Distretto del Mobile del Livenza conta 1.389 unità locali, per un totale di 20.860 addetti (censimento ISTAT 2001), che sono distribuite all'interno di 11 Comuni del Friuli-Venezia Giulia. Le principali materie prime impiegate nel processo produttivo sono per il 21% legno massello e, per la quota rimanente, derivati del legno, quali pannelli e multistrati, per un totale complessivo che si aggira attorno alle 500.000 t/anno [AA06]. Nel corso degli anni la filiera produttiva del mobile ha conosciuto processi di diversificazione sia per l'ampliamento e l'innovazione dei processi offerti, sia per la disaggregazione a monte dei cicli produttivi e la nascita di imprese specializzate nella componentistica.

La filiera produttiva del mobile (figura 1) presenta due principali flussi in ingresso derivanti dal tipo di materia prima impiegata. Tra i diversi processi del flusso produttivo, che generano in output scarto legnoso trattato, si ricordano la sezionatura del pannello, la nobilitazione dello stesso, le lavorazioni sul pannello, le operazioni di pre-montaggio.

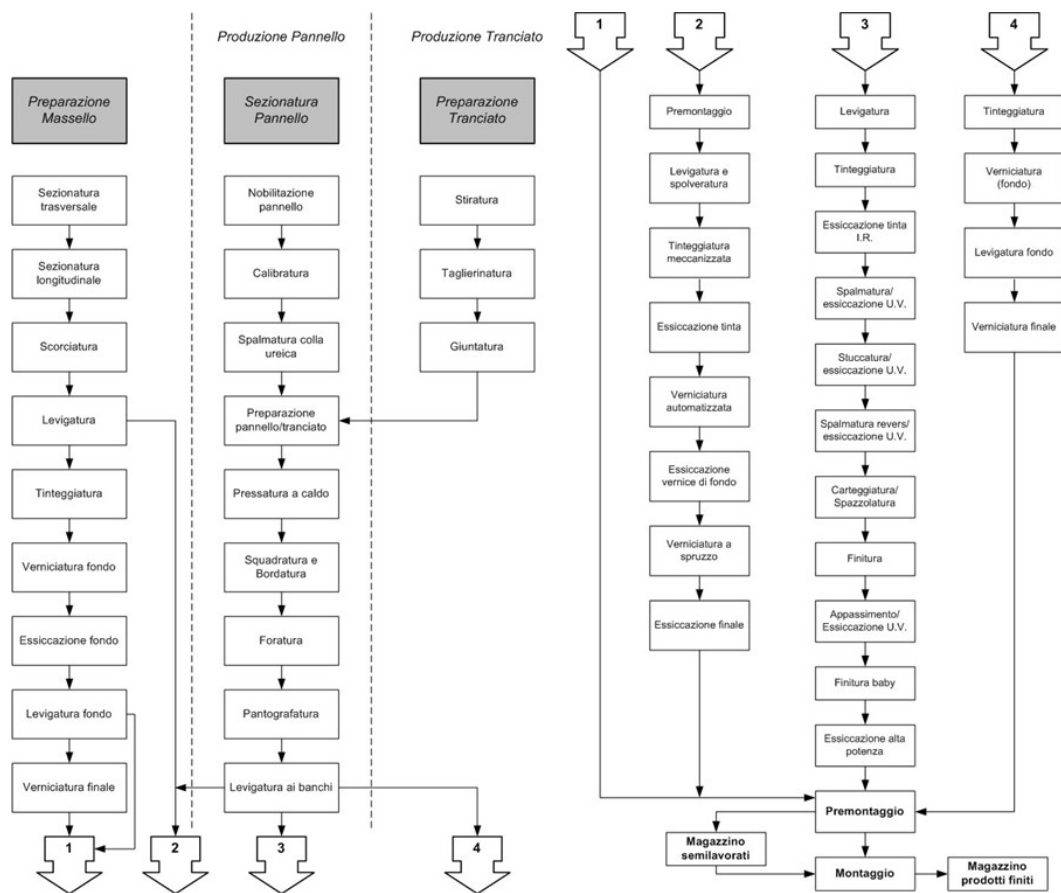


Figura 1. Diagramma di flusso del ciclo produttivo del mobile

Per quanto riguarda gli impianti di servizio, nel seguito si dedicherà particolare attenzione a quelli termici che svolgono il ruolo di produzione di calore per fini produttivi (per lo più operazioni di verniciatura) e di produzione di calore al fine di riscaldare gli ambienti di lavoro. Gli impianti termici, presenti nel territorio del Distretto del Mobile del Livorno, sono alimentati sia a combustibili tradizionali, sia a scarti legnosi derivanti dalla lavorazione del legno.

Le aziende della filiera del mobile, per il proprio fabbisogno di energia termica, utilizzano tre tipi di combustibili:

- combustibili tradizionali: olio combustibile denso, olio combustibile fluido 3/5 e metano;
- combustibili ausiliari: gasolio e GPL;
- combustibili alternativi: residui legnosi di lavorazione e scarti di legno.

Va considerato che la lenta, ma progressiva riconversione dell'alimentazione degli impianti termici aziendali da scarti di legno a combustibili fossili muove non tanto da

considerazioni di carattere economico, quanto dalle difficoltà gestionali del combustibile “rifiuto” e soprattutto dalla fissazione di limiti alle emissioni in atmosfera di gran lunga inferiori a quelli accettati, a parità di inquinante, per i combustibili fossili. La ripartizione dei consumi energetici ed i valori specifici per addetto sono riportati in tabella 1 [Ca02].

| Fonte | Quantità (MJ) | Percentuale (%) | Consumo specifico per addetto (MJ) |
|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------------|
| Energia elettrica | 567.371.723 | 52,5 | 163.973 |
| Gasolio | 32.447.419 | 2,6 | 7.972 |
| Olio combustibile | 46.209.030 | 3,6 | 11.354 |
| Metano | 281.720.674 | 22,2 | 69.219 |
| GPL | 6.234.183 | 0,5 | 1.532 |
| Legno | 236.251.357 | 18,6 | 58.047 |
| TOTALE | 1.270.234.386 | 100,0 | 312.097 |

Tabella 1. Consumi energetici nel Distretto del mobile del Livenza (dati 2000)

Lo studio evidenzia come il metano e l’energia elettrica rappresentano oltre il 74% del totale di risorse energetiche necessarie per soddisfare il fabbisogno delle aziende del distretto. Dallo stesso studio si rileva che lo scarto legnoso utilizzato come fonte di energia in sostituzione di sorgenti tradizionali per l’alimentazione dei generatori di calore, copre un fabbisogno energetico pari a oltre il 39% del totale prodotto dalle risorse destinate alla produzione di calore e ben oltre il 18% del totale di fabbisogno energetico delle aziende del distretto.

Proprio lo scarto legnoso costituisce una quota significativa dei rifiuti prodotti dalle aziende del mobile. La quantità di rifiuti che sono stati prodotti nell’anno 2002 negli 11 Comuni del Distretto del Mobile del Livenza della provincia di Pordenone ammontano complessivamente a 57.757.138 kg (tabella 2) [Ig06]. Tra questi rifiuti prodotti risulta di fondamentale importanza per lo studio il rifiuto CER 030105 che identifica lo scarto legnoso che può essere avviato a combustione. Tale rifiuto, nel D.M. 05.02.1998, è diviso in due categorie:

- rifiuti della lavorazione del legno e affini non trattati;
- rifiuti della lavorazione del legno e affini trattati.

Uno studio recente [Ca02] riporta che il quantitativo di CER 030105 prodotto nel 2000 è stato pari a 30.101.487 kg con un quantitativo di 7.788 kg/addetto. Nello stesso studio si rileva che, nelle aziende che utilizzavano lo scarto legnoso come fonte energetica, il 69% di esso veniva bruciato ed il rimanente portato ad altra destinazione. Se invece si prende in considerazione il dato relativo al consumo di legno come fonte energetica per totale addetti, si ricava che lo scarto legnoso destinato alla combustione nell’intero distretto raggiungeva il 43% del totale.

Tali valori sono confrontabili con quelli desunti da [AA98] in cui si riscontra che nel 1997, nelle aziende che utilizzavano lo scarto legnoso come fonte energetica, la percentuale

di esso che veniva bruciato era pari al 75% ed, in particolare, all'85% degli scarti di legno vergine e al 63% degli scarti di legno trattato. Inoltre da quest'ultimo studio si riscontra che sempre nel 1997 la percentuale di scarto legnoso trattato prodotto era pari al 45% del totale dello scarto legnoso prodotto.

| Codice Europeo Rifiuti (CER) | Quantità (kg) | % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|
| 01 – Rifiuti derivanti dalla prospezione, estrazione da miniera o cava, nonché dal trattamento fisico o chimico di minerali | 390.200 | 0,7 |
| 03 – Rifiuti della lavorazione del legno e della produzione di pannelli, mobili, polpa, carta e cartone | 46.970.988 | 81,3 |
| 08 – Rifiuti della produzione, formulazione, fornitura ed uso di rivestimenti (pitture, vernici e smalti vetriati), adesivi, sigillanti e inchiostri per stampa | 1.777.427 | 3,1 |
| 10 – Rifiuti provenienti da processi termici | 462.614 | 0,8 |
| 12 – Rifiuti prodotti dalla lavorazione e dal trattamento fisico e meccanico superficiale di metalli e plastica | 525.009 | 0,9 |
| 13 – Oli esausti e residui di combustibili liquidi (tranne oli commestibili 05 e 12) | 583.887 | 1,0 |
| 15 – Rifiuti di imballaggio, assorbenti, stracci, materiali filtranti e indumenti protettivi (non specificati altrimenti) | 6.216.929 | 10,8 |
| 20 – Rifiuti urbani (rifiuti domestici e assimilabili prodotti da attività commerciali e industriali nonché dalle istituzioni) inclusi i rifiuti della raccolta differenziata | 363.163 | 0,6 |
| Altri | 466.921 | 0,8 |
| TOTALE | 57.757.138 | 100,0 |

Tabella 2. Scarti prodotti nel Distretto del mobile del Livenza nel 2002

Lo scarto legnoso trattato che non viene riutilizzato per la produzione di energia termica solitamente viene in minima parte conferito in discarica (si ipotizza un 2% del totale dello scarto legnoso prodotto), e per la rimanente parte viene utilizzato per la produzione di pannelli truciolari. Il 2% dello scarto legnoso che va a discarica è considerato rifiuto speciale assimilato a quello urbano e va smaltito in discarica di prima categoria. Per quanto riguarda le ceneri di combustione la loro totalità viene conferita in discarica di seconda categoria (ex 2B).

Un ultimo aspetto contestuale di interesse per lo sviluppo del presente studio, concerne la dislocazione territoriale dei poli di origine e destinazione dei materiali. In particolare, la valutazione degli impatti, presentata nel seguito, richiede di stabilire le distanze percorse dagli scarti legnosi e dalle ceneri di combustione per raggiungere la destinazione per il loro utilizzo o smaltimento. Le aziende produttrici di pannelli che utilizzano gli scarti legnosi del distretto sono: la Fantoni di Osoppo (UD), la Bipan di Bicinicco (UD) e il Gruppo Saviola di Viadana (MN). Per il calcolo delle distanze, si è ritenuto sufficiente, per il livello di scala territoriale analizzato, assumere come polo di origine dello scarto legnoso, un ipotetico centro mediano del distretto del mobile. Per la determinazione della sua posizione si tratta di risolvere un problema di localizzazione, che consiste nella ricerca della posizione da assegnare ad un insieme di strutture in funzione della distribuzione di una domanda, reale o potenziale, relativa alla loro utilizzazione. Si è utilizzata la localizzazione a rete avente come vertici gli undici Comuni del distretto e si è risolto un problema di 1-mediana. In estrema sintesi, si è identificato il vertice della rete che rappresenta la 1-mediana. Nel calcolo della 1-mediana si sono posti come distanza tra due vertici i km stradali e come pesi si è usata la macro-categoria CER 03. Nella figura 2 è riportata la rete utilizzata da cui è risultata come 1-mediana il comune di Prata di Pordenone.

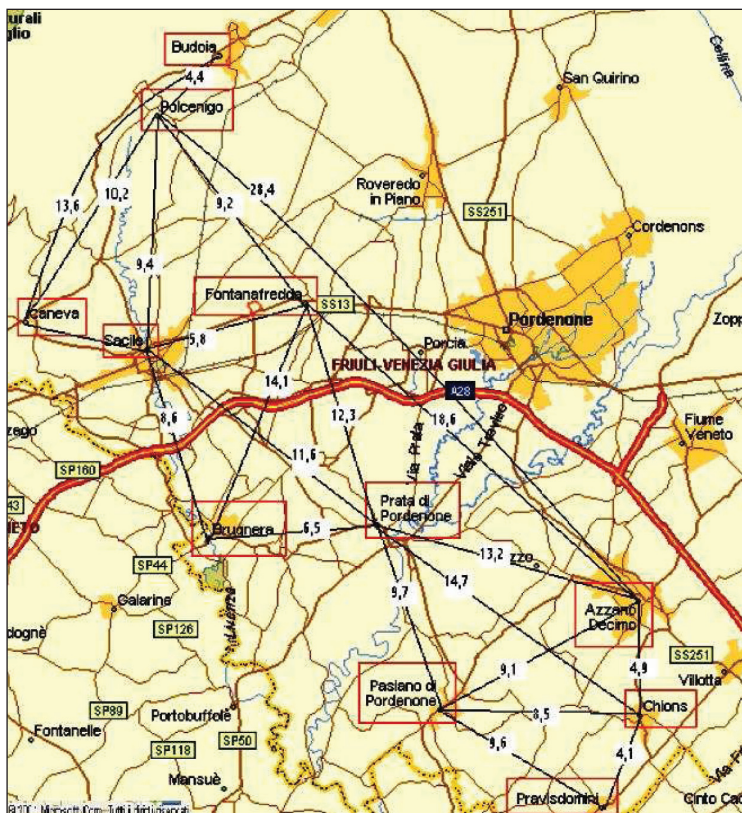


Figura 2. Rete del distretto analizzato

Supponendo che lo scarto legnoso sia distribuito in uguale misura tra le tre aziende di produzione del pannello, la distanza media risulta di 132 km, per cui conteggiando sia l'andata che il ritorno si ha un totale di 264 km. Il trasporto dello scarto legnoso solitamente avviene su autocarro a tre assi con rimorchio, con un carico utile di 26 t. In realtà il carico trasportato risulta molto minore (15 t), in parte a causa del peso specifico dello scarto legnoso ma, soprattutto, perché quest'ultimo è caricato alla rinfusa.

Le ceneri derivanti dal processo di combustione devono essere smaltite in discariche di seconda categoria (ex 2B); tale tipo di discarica non è presente nella provincia di Pordenone né nella regione Friuli-Venezia Giulia, mentre se ne trovano in Veneto, Emilia Romagna, Lombardia, Piemonte e stati confinanti. Nel caso in esame si è stimata una distanza media di trasporto di 300 km. Gli scarti legnosi sono conferiti in discarica di prima categoria; vista la presenza di diverse discariche di prima categoria nel territorio si è stimata una distanza media di trasporto di 50 km. Il trasporto dello scarto legnoso avviene di solito su autocarro a tre assi il cui carico utile teorico è di 10 t; per gli stessi motivi evidenziati più sopra, il carico utile trasportato risulta di 7 t.

2. **Gli impianti termici e il processo di combustione**

Per impianto termico si intende un impianto generale atto ad assicurare, a seconda dei casi, la produzione di calore (o freddo) necessario per determinati processi tecnologici o il riscaldamento (o raffreddamento) degli ambienti [Mo97]. In questo studio si tratteranno solo gli impianti termici per la produzione di calore. Nel locale centrale termica sono installati tutti o in parte gli impianti di produzione dell'energia termica, mentre il combustibile utilizzato può essere un combustibile solido (scarto legnoso), liquido (BTZ o gasolio) o gassoso (metano).

Gli impianti termici sono costituiti da un insieme di componenti fra i quali:

- gli eventuali sistemi di stoccaggio, preparazione e alimentazione del combustibile;
- il generatore di calore;
- i sistemi di depurazione dei fumi;
- i condotti di adduzione e il camino.

Per quanto riguarda il primo tipo di componenti, sono presenti sostanziali differenze di configurazione in relazione al tipo di combustibile. BTZ e gasolio sono solitamente trasportati in autobotti o carri cisterna, il combustibile viene scaricato in serbatoi di accumulo, i quali sono solitamente dotati di un sistema di riscaldamento (serpentine sul fondo, riscaldatore a bocca e centralina per la produzione e circolazione del fluido riscaldante). Se non è previsto un serbatoio di servizio in un locale di contenimento, il gruppo di spinta (impianto di filtrazione, pompaggio e riscaldamento del combustibile per mezzo di uno scambiatore di calore) è direttamente alimentato dal serbatoio di deposito per gravità o tramite delle pompe di travaso. Quando si utilizza il gasolio non occorre il riscaldamento fino a temperature di -15°C . Il metano è fornito a mezzo di tubazione e non richiede alcun serbatoio di accumulo; deve però essere decompresso fino al valore di pressione con cui vengono alimentati i bruciatori. Gli scarti legnosi sono stoccati in silos (in muratura, cemento precompresso o acciaio) previa triturazione in appositi macinatori (tamburo rotante a lame, martelli o denti), vengono poi estratti con degli estrattori a catena

o a coclea. Vengono quindi convogliati per gravità in una valvola stellare per dosare il quantitativo di materiale da introdurre nel sistema di alimentazione continua o discontinua del combustibile (tramogge, spintori, coclee ecc.).

Il generatore di calore è composto dal focolare (bruciatore o griglia e camera di combustione) e dallo scambiatore di calore. I generatori alimentati a scarti legnosi hanno comunque un bruciatore di accensione e sostegno della combustione, mentre il focolare è solitamente costituito da una griglia mobile o fissa, da tamburi rotanti o da letti fluidi. Le caldaie a griglia mobile sono le più utilizzate nel distretto del Mobile-arredo. Concettualmente tale griglia è suddivisibile in una zona primaria di essiccazione, una zona successiva di combustione vera e propria e una zona finale di esaurimento del processo e scarico delle ceneri. L'aria di combustione è immessa sia al di sotto delle griglia in quantità stechiometrica (aria primaria), sia al di sopra con un opportuno eccesso d'aria (aria secondaria), per consentire il completamento della combustione. L'attuale normativa (D.M. 05.02.1998) non richiede la camera di post-combustione in quanto si riesce ad ottenere un'adequata diluizione dei fumi sfruttando una combustione più efficiente. Spesso tale zona viene intesa come una frazione della camera di combustione, il cui confine iniziale coincide con il punto dell'ultima immissione di aria secondaria e quello finale con l'inizio della zona di recupero [Na05], che ha lo scopo di completare i processi di ossidazione. I generatori a combustibili liquidi o gassosi utilizzano un opportuno bruciatore.

Per quanto riguarda il trattamento dei prodotti della combustione a valle del processo, sono presenti dei dispositivi per ridurre le quantità di inquinanti solidi emessi solo nel caso della combustione di scarti legnosi trattati. Una soluzione frequente è quella che prevede in sequenza, lungo il percorso dei fumi, prima l'utilizzo di un multiciclone e poi l'utilizzo di un filtro a maniche o di un elettrofiltro. I condotti di adduzione sono realizzati in lamiera di acciaio, coibentati esternamente con lana di roccia o vetro e rivestiti in lamierino zincato. I prodotti della combustione vengono aspirati e convogliati al camino mediante elettroventilatori centrifughi.

Sono infine presenti alcuni componenti ausiliari che sono di aiuto ed ausilio alla produzione di energia termica (sistema di pulizia del generatore di calore, sistema di carico delle ceneri nel generatore di calore alimentato a scarto legnoso trattato, sistema di demineralizzazione dell'acqua, sistema di preriscaldamento del combustibile, strumenti di regolazione e controllo, piping e pompe di alimentazione e di circolazione, scambiatore di calore ecc.).

I combustibili sono quelle sostanze che, in opportune condizioni, sono capaci di combinarsi con un comburente sviluppando notevoli quantità di calore, mentre le reazioni di combustione sono delle reazioni di ossidazione [Mi00]. Per la valutazione della combustione interessa conoscere la composizione chimica e il potere calorifico dei combustibili.

Per quanto riguarda lo scarto legnoso trattato, esso è definito dal D.M. 05.02.1998 allegato 2, suballegato 1, punto 6 in base alla provenienza, alle sue caratteristiche, al contenuto massimo di resine urea-formaldeide o melamina-formaldeide o urea-melamina-formaldeide (20% come massa secca/massa secca di pannello), al contenuto massimo di resina a base di difenilmetandissocianato (8% come massa secca/massa secca di pannello),

al contenuto massimo di cloro (0,9% in massa) e al contenuto massimo di additivi – solfato di ammonio, urea-esametilentetrammina (10% come massa secca/massa secca di pannello).

Dai dati contenuti in [Ca02] si rileva che il 21% della materia prima in ingresso è legato al massello e il 79% sono sottoprodotti quali multistrati e pannelli truciolari o di fibra. Con buona approssimazione si può ipotizzare che lo scarto legnoso trattato sarà dato per il 76% da scarti di pannelli truciolati o di fibra e da un 24% da scarti di legno massello o multistrato, la cui composizione chimica media è riportata in tabella 3, mentre il potere calorifico inferiore medio del legno, avente un'umidità intorno al 7-10%, è di 15.910 kJ/kg [Ar01] [He01]. Per quanto riguarda la composizione chimica del pannello, si sono presi a riferimento i valori medi ottenuti dalle schede di sicurezza di alcune aziende produttrici e i cui risultati sono sinteticamente riportati in tabella 3, mentre il potere calorifico inferiore è di 18.422 kJ/kg.

| Composizione chimica (% in peso) | C | H | O | S | Inerti | N | Umidità | Combustibile |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|--------|------|---------|-------------------------|
| Valori medi | 50,00 | 5,00 | 40,50 | 0,50 | 3,50 | 0,50 | 0,00 | Legno |
| Valori medi riportati al 7% umidità | 46,50 | 4,65 | 37,67 | 0,47 | 3,26 | 0,47 | 7,00 | |
| Valori medi | 45,00 | 4,46 | 36,39 | 0,65 | 2,87 | 3,62 | 7,00 | Pannello |
| Valori medi | 45,36 | 4,51 | 36,70 | 0,61 | 2,96 | 2,86 | 7,00 | Scarti legnosi trattati |
| Valori medi | 86,00 | 12,00 | 0,50 | 1,00 | 0,10 | 0,40 | 0,00 | BTZ |
| Valori medi | 86,40 | 12,59 | 0,50 | 0,30 | 0,01 | 0,20 | 0,00 | Gasolio |
| Valori medi | 75,00 | 25,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | Metano |

Tabella 3. Composizione chimica dei combustibili

Per quanto riguarda la composizione chimica degli scarti legnosi trattati, dai dati raccolti si è valutato il valore medio pesato che è riportato in tabella 3, mentre il potere calorifico inferiore è risultato di 17.816 kJ/kg. Le normative in vigore sulla combustione degli scarti legnosi trattati, in particolare, sulle emissioni da essa prodotte sono presenti nel D.M. 05.02.1998, successivamente modificato dal D.M. 05.04.2006 n. 186 che ha introdotto un vincolo sulla quantità massima di rifiuto che può essere bruciato, e nel D. Lgs. 11.05.2005 n. 133. Il decreto ministeriale riporta le norme tecniche relative al

recupero dei rifiuti e specifica i valori limite e le prescrizioni per le emissioni in atmosfera delle attività di recupero di energia dai rifiuti della lavorazione del legno e affini trattati in regime semplificato, mentre il decreto legislativo si applica nel caso di incenerimento o coincenerimento di rifiuti in regime autorizzato. Solitamente tutti gli impianti industriali di combustione degli scarti legnosi trattati sono autorizzati in regime semplificato, per cui la norma di riferimento è il D.M. 05.02.1998. I valori limite di emissione espressi da tale decreto sono riportati sinteticamente nella tabella 4 per gli impianti con potenza termica nominale non inferiore a 1 MW.

| Limiti alle emissioni riferiti ad un tenore di ossigeno dei fumi anidri dell'11% in volume | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| NOx (come valore medio giornaliero) | | 200 mg/Nm ³ |
| NOx (come valore orario) ove non previsto il controllo in continuo | | 400 mg/Nm ³ |
| PCDD + PDC (come diossina equivalente) | | 0,1 ng/Nm ³ |
| Idrocarburi policiclici aromatici (I.P.A.) | | 0,01 mg/Nm ³ |
| Per gli altri inquinanti si applicano i valori medi: | giornalieri | Su 30 minuti ¹ |
| Polvere totale | 10 mg/Nm ³ | 10 – 30 mg/Nm ³ |
| Sostanze organiche sotto forma di gas e vapori, espresse come carbonio organico totale (COT) | 10 mg/Nm ³ | 10 – 20 mg/Nm ³ |
| Cloruro di idrogeno (HCl) | 10 mg/Nm ³ | 10 – 60 mg/Nm ³ |
| Fluoruro di idrogeno (HF) | 1 mg/Nm ³ | 2 – 4 mg/Nm ³ |
| Biossido di zolfo | 50 mg/Nm ³ | 50 – 200 mg/Nm ³ |
| Valori medi durante il periodo di campionamento di 30 minuti come minimo e di 8 ore come massimo ² | | |
| Cadmio e suoi composti, espressi come cadmio (Cd) Tallio e suoi composti, espressi come tallio (Tl) | | totale 0,05 mg/Nm ³ |
| Mercurio e suoi composti, espressi come mercurio (Hg) | | 0,05 mg/Nm ³ |
| Antimonio e suoi composti, espressi come antimonio (Sb) Arsenico e suoi composti, espressi come arsenico (As) Piombo e suoi composti, espressi come piombo (Pb) Cromo e suoi composti, espressi come cromo (Cr) Cobalto e suoi composti, espressi come cobalto (Co) Rame e suoi composti, espressi come rame (Cu) Manganese e suoi composti, espressi come manganese (Mn) Nichel e suoi composti, espressi come nichel (Ni) Vanadio e suoi composti, espressi come vanadio (V) Stagno e suoi composti, espressi come stagno (Sn) | | Totale 0,5 mg/Nm ³ |
| Valore limite di emissione per le concentrazioni di monossido di carbonio come valore medio giornaliero (CO) | | 50 mg/Nm ³ |
| Valore limite di emissione per le concentrazioni di monossido di carbonio per tutte le misurazioni determinate come valori medi su 30 minuti (CO) | | 100 mg/Nm ³ |

NOTE: ¹ Tutti i valori medi di 30 minuti non superano i valori limite di emissione minori, se invece il 97% dei valori medi su 30 minuti rilevati nel corso dell'anno non superano i valori di emissioni più elevati

² Questi valori medi si applicano anche ai metalli ed ai loro composti presenti nelle emissioni anche sotto forma di gas e vapore

Tabella 4. Limiti emissivi per impianti alimentati con scarti legnosi

Per quanto riguarda i combustibili liquidi (BTZ e gasolio) sono stati presi come riferimento a livello di composizione chimica i valori riportati in tabella 3, mentre il potere calorifico inferiore del BTZ è di 40.612 kJ/kg e del gasolio 43.124 kJ/kg. La normativa di riferimento per le emissioni atmosferiche derivanti da combustibili liquidi è il D. Lgs. 03.04.2006 n. 152, noto come “Testo unico ambientale”, e i valori sono riportati nell’allegato I parte quinta (tabella 5): come si può notare non vi è nessuna limitazione per quanto riguarda le emissioni di monossido di carbonio (CO).

Per quanto riguarda il metano, sono stati presi a riferimento a livello di composizione chimica i valori riportati in tabella 3, mentre il potere calorifico inferiore è di 35.588 kJ/Nm³. La normativa di riferimento per le emissioni atmosferiche derivanti dalla combustione del metano è il D. Lgs. 03.04.2006 n. 152 e i valori sono riportati nell’allegato I parte quinta (tabella 6): anche in questo caso non vi è nessuna limitazione per quanto riguarda le emissioni di monossido di carbonio (CO).

| Valori di emissione riferiti ad un tenore di ossigeno nell’effluente gassoso nel 3% | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| | Potenza termica nominale < 5 MW | Potenza termica nominale ≥ 5 MW |
| Polveri | 150 mg/Nm ³ | 100 mg/Nm ³ |
| | Non si applica la parte II, paragrafo 2 se il valore limite di emissione per le polveri è rispettato senza l’impiego di un impianto di abbattimento | |
| Ossidi di azoto | 150 mg/Nm ³ | |
| Ossidi di zolfo | 1700 mg/Nm ³ Il valore di emissione per gli ossidi di zolfo si considera rispettato se sono utilizzati combustibili con contenuto di zolfo uguale o inferiore all’1% | |

Tabella 5. Limiti emissivi per impianti alimentati con BTZ o gasolio

| Valori di emissione riferiti ad un tenore di ossigeno nell’effluente gassoso nel 3% | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Polveri | 5 mg/Nm ³ Il valore limite di emissione per le polveri si considera rispettato se viene utilizzato metano o GPL Se il combustibile utilizzato è gas d’altoforno il valore di emissione è di 15-20 mg/Nm ³ o se gas da forno a coke o gas d’acciaieria il valore di emissione è di 50 mg/Nm ³ |
| Ossidi di azoto | 350 mg/Nm ³ Se il combustibile è un gas di processo contenente composti dell’azoto non si applica alcun valore limite di emissione; le emissioni devono comunque essere ridotte per quanto possibile. |
| Ossidi di zolfo | 35 mg/Nm ³ Il valore limite di emissione per le polveri si considera rispettato se viene utilizzato metano o GPL Se il combustibile utilizzato è gas d’altoforno il valore di emissione è di 1700 mg/Nm ³ o se gas da forno a coke o gas d’acciaieria il valore di emissione è di 800 mg/Nm ³ |

Tabella 6. Limiti emissivi per impianti alimentati con metano

I dati necessari per valutare il processo di combustione comprendono:

- il tipo di combustibile utilizzato, con particolare riferimento alla composizione chimica in massa e al potere calorifico inferiore;
- il quantitativo di aria teorica (stechiometrica).

Nota la composizione chimica in massa e il quantitativo massimo di monossido di carbonio che può essere emesso, si ricava la percentuale di carbonio presente nel combustibile C_{co} che si trasforma in CO e quella C_{co_2} che si trasforma in CO_2 . Durante il processo di combustione la massa di ciascun elemento rimane invariata per cui può essere eseguito un bilancio di massa che consente di stabilire che per 1 kg di C occorrono 2,67 kg di O_2 , per 1 kg di H_2 occorrono 8 kg di O_2 , per 1 kg di S occorre 1 kg di O_2 e per 1 kg di C occorrono 1,333 kg di O_2 . Conoscendo i rapporti tra gli elementi e la composizione chimica del combustibile è possibile valutare la massa stechiometrica di ossigeno m_o secondo la relazione [Ku05]:

$$m_o = \left(\frac{PM_{O_2}}{PM_C} \right) \cdot C_{CO_2} + \left[\left(\frac{PM_{O_2}}{2} \right) \cdot C_{CO} + \left(\frac{PM_{O_2}}{PM_{H_2}} \right) \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + \left(\frac{PM_{O_2}}{PM_S} \right) \cdot S \right] \quad [\text{kg/kg}_r]$$

avendo indicato con:

PM = massa molare

H_2 , O_2 e S i contenuti di idrogeno, ossigeno e zolfo in 1 kg di combustibile.

Il volume stechiometrico di ossigeno q_o è pari a [Ku05]:

$$q_o = m_o \cdot \left(\frac{22,4}{PM_{O_2}} \right) \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}_r]$$

Il volume di aria stechiometrica risulta [Ku05]:

$$q_{at} = 4,8 \cdot q_o \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}_r]$$

- il volume e la composizione teorica dei fumi.

Il volume dei fumi secchi q_{is} può essere stimato dalle reazioni di combustione tenendo presente che l'azoto presente nell'aria non subisce trasformazioni [Ku05]:

$$q_{is} = \left(\frac{22,4}{PM_C} \right) \cdot C_{CO} + \left(\frac{22,4}{PM_C} \right) \cdot C_{CO_2} + \left(\frac{22,4}{PM_S} \right) \cdot S + q_{a_2} - q_o + \left(\frac{22,4}{PM_{N_2}} \right) \cdot N \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}_r]$$

Il volume dei fumi umidi q_{tu} è [Ku05]:

$$q_{tu} = q_{ts} + \left(\frac{22,4}{PM_{H_2O}} \right) \cdot U + \left(\frac{22,4}{PM_{H_2}} \right) \cdot H \quad [Nm^3/kg_r]$$

N e U sono i contenuti di azoto e acqua in 1 kg di combustibile.

- il quantitativo di aria di arricchimento.

Conoscendo la percentuale di O_2 che devono avere i fumi anidri all'uscita dal camino, si ottiene il valore dell'aria pratica o di arricchimento [Ku05]:

$$q_{arr} = \left[\frac{(q_{ts} \cdot \%O_2)}{(21 - \%O_2)} \right] \quad [Nm^3/kg_r]$$

mentre l'eccesso d'aria risulta dal rapporto tra l'aria di arricchimento e l'aria stechiometrica:

$$e = \frac{q_{arr}}{q_{at}}$$

- il quantitativo di aria comburente effettiva e di fumi effettivi.

L'aria comburente q_a è data da [Ku05]:

$$q_a = q_{arr} + q_{at} \quad [Nm^3/kg_r]$$

mentre i quantitativi di fumi secchi e umidi effettivi (q_{es} e q_{eu}) sono rispettivamente:

$$q_{es} = q_{arr} + q_{ts} \quad q_{eu} = q_{arr} + q_{tu} \quad [Nm^3/kg_r]$$

per cui la nuova composizione dei fumi secchi sarà data da:

$$q_{es} = \left(\frac{22,4}{PM_C} \right) \cdot C_{CO} + \left(\frac{22,4}{PM_C} \right) \cdot C_{CO_2} + \left(\frac{22,4}{PM_S} \right) \cdot S + q_{a_2} - q_o + q_{arr} \cdot 0,79 + \left(\frac{22,4}{PM_{N_2}} \right) \cdot N \quad [Nm^3/kg_r]$$

mentre il volume dei fumi umidi q_{eu} è:

$$q_{eu} = q_{es} + \left(\frac{22,4}{PM_{H_2O}} \right) \cdot U + \left(\frac{22,4}{PM_{H_2}} \right) \cdot H \quad [Nm^3/kg_r]$$

- la temperatura teorica di combustione o di fiamma.

È la temperatura massima che potrebbe essere raggiunta nel corso di una combustione completa se tutto il calore fosse speso unicamente per riscaldare i prodotti della combustione. Essa, con eccesso d'aria, risulta inferiore in quanto il calore disponibile è lo stesso, ma la quantità di gas da riscaldare è maggiore in quanto comprende anche l'aria in eccesso. Essa (t_f) può approssimativamente essere calcolata introducendo il coefficiente di combustione $\varphi = 0,85$, la temperatura t_0 ($=15^\circ\text{C}$) e il potere calorifico inferiore Pci e per ricavarla (t_f) si fa riferimento alla relazione [Ku05]:

$$\left[H_{gas(t_f)} - H_{gas(t_0)} \right] \cdot \left(\frac{q_{eu}}{22,4} \right) = \varphi \cdot (Pci \cdot 4,186)$$

dove l'entalpia dei gas risulta [Ku05]:

$$H_{gas} = \left\{ \frac{\left[q_{a_2} - q_o + q_{arr} \cdot 0,79 + \left(\frac{22,4}{PM_{N_2}} \right) \cdot N \right]}{q_{eu}} \cdot H_{N_2} + \left(\frac{q_{arr} \cdot 0,21}{q_{eu}} \right) \cdot H_{O_2} + \left[\frac{\left(\frac{22,4}{PM_C} \right) \cdot C_{CO_2}}{q_{eu}} \right] \cdot H_{CO_2} + \right. \\ \left. + \left[\frac{\left(\frac{22,4}{PM_{H_2O}} \right) \cdot U + \left(\frac{22,4}{PM_{H_2}} \right) \cdot H}{q_{eu}} \right] \cdot H_{H_2O} + \left[\frac{\left(\frac{22,4}{PM_C} \right) \cdot C_{CO}}{q_{eu}} \right] \cdot H_{CO} + \left[\frac{\left(\frac{22,4}{PM_S} \right) \cdot S}{q_{eu}} \right] \cdot H_{SO_2} \right.$$

- le portate di aria comburente, dei fumi e del combustibile.

Nota la potenza termica oraria richiesta W_h , la potenza del generatore di calore da installare W può essere calcolata sovradimensionando di un 20% la potenza termica effettiva richiesta:

$$W = \left(\frac{W_h}{3600} \right) \cdot (1+0,2) \quad [\text{MW}]$$

Conoscendo il potere calorifico inferiore del combustibile Pci , si può risalire alla portata di combustibile necessario p_c noto il rendimento del generatore η :

$$p_c = \frac{W_h}{Pci \cdot \eta} \quad [\text{kg/h}]$$

La portata d'aria p_a comburente è [Ku05]:

$$p_a = q_a \cdot p_c \quad [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

mentre la portata dei fumi umidi p_{eu} è:

$$p_{eu} = q_{eu} \cdot p_c \quad [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

ed in particolare la portata della CO_2 risulta essere [Ku05]:

$$J_{-\text{CO}_2} = \left(\frac{q_{\text{CO}_2} \cdot p_c}{W_h \cdot 22,4} \right) \cdot PM_{\text{CO}_2}$$

La portata delle ceneri p_{cn} , noto il contenuto di inerti per 1 kg di combustibile I, sarà:

$$p_{cn} = p_c \cdot I \quad [\text{kg}/\text{h}]$$

La portata volumetrica di fumo emesso dalla produzione di 1 MJ di energia termica è pari a:

$$A = \frac{p_{eu}}{W_h} \quad [\text{Nm}^3/\text{MJ}]$$

Scelto il tipo di combustibile e la potenza termica richiesta, i calcoli del processo di combustione sono stati determinati impiegando il software EES ver. 7.731¹. Essendo di interesse per lo studio, si riportano alcuni dati significativi rilevabili dalla combustione dello scarto legnoso trattato (figura 3 e tabella 7). I valori ottenuti permettono di definire i flussi in input ed output del processo di combustione dello scarto di produzione che si confronteranno con quelli del BTZ, gasolio e metano che risultano già presenti nel database del software Gabi4, specifico per la determinazione del Life Cycle Assessment. In particolare risulta utile il valore calcolato relativo alla portata dei fumi, che è in linea con una parte dei dati reali misurati sperimentalmente su diversi generatori di calore del Distretto del Mobile (figura 4).

NOTE: ¹ Licenza di utilizzo concessa al Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Trieste.

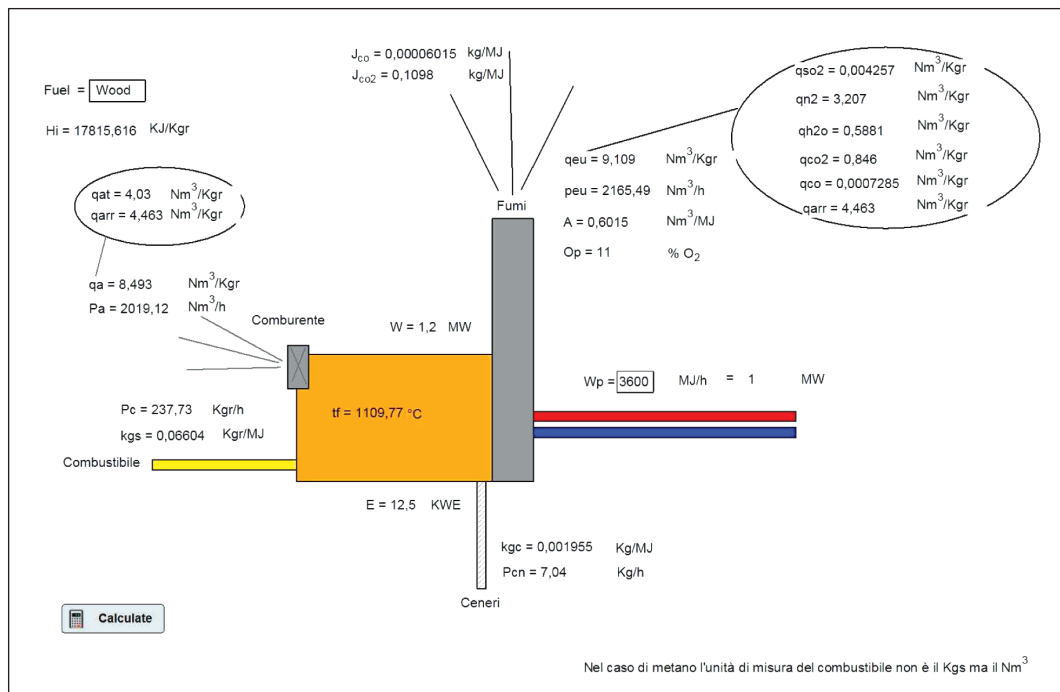


Figura 3. Modello elaborato con il software EES

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------|
| Portata di aria teorica (q_{at}) | 4,0 Nm³/h |
| Portata di aria pratica o di arricchimento (q_{arr}) | 4,5 Nm³/h |
| Portata di aria comburente totale (q_a) | 8,5 Nm³/h |
| Portata di fumi effettivi umidi (q_{eu}) | 9,1 Nm³/kg |
| Temperatura teorica di combustione (t_f) | 1109,8°C |
| Potenza termica oraria richiesta (W_h) | 1 MW |
| Potenza del generatore di calore (W) | 1,2 MW |
| Portata di combustibile (p_c) | 237/7 kg/h |
| Portata di aria comburente (p_a) | 2019,1 Nm³/h |
| Portata di fumi umidi (p_{eu}) | 2165,5 Nm³/h |
| Ossigeno presente nei fumi (O_p) | 11% |
| Portata della CO ₂ uscente con i fumi (J_{CO_2}) | 0,1 kg/MJ |
| Portata di ceneri (p_{cn}) | 7,0 kg/h |
| Volume di fumo emesso dalla produzione di 1 MJ di energia termica (A) | 0,6 Nm³/MJ |

Tabella 7. Dati relativi alla combustione dello scarto legnoso

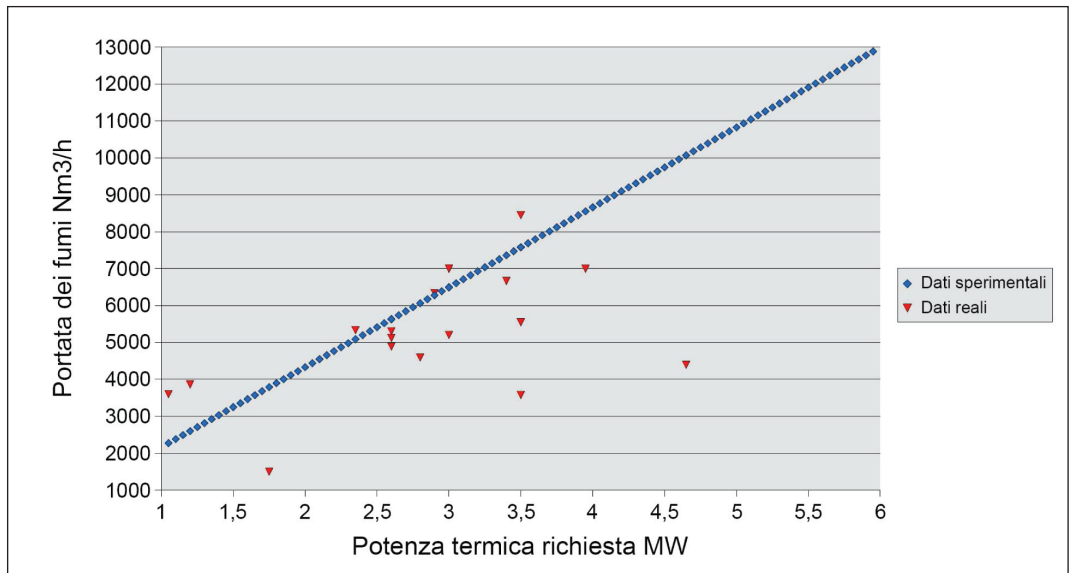


Figura 4. Confronto tra valori teorici e valori misurati

Alcuni dei valori misurati sul campo risultano più bassi di quelli teorici perchè non si è potuto accertare il regime di parzializzazione in cui si trovava il generatore di calore. Moltiplicando i valori limite riportati dal D.M 05.02.1998 per il volume di fumo emesso dalla produzione di 1 MJ di energia termica (tabella 7), si ottengono i valori limite delle emissioni derivanti dalla combustione dello scarto legnoso trattato, espressi in massa su MJ. Tali valori sono i seguenti:

- NOx (come valore medio giornaliero) 120,3 mg/MJ
- NOx (come valore medio orario) 240,6 mg/MJ
- ove non previsto il controllo in continuo
- PCDD + PDC (come diossina equivalente) 0,060 ng/MJ
- (come valore medio rilevato per un periodo di campionamento di 8 ore)
- Idrocarburi policiclici aromatici (I.P.A.) 0,0060 mg/MJ
- (come valore medio rilevato per un periodo di campionamento di 8 ore)

Durante il funzionamento non devono essere superati:

a) valori medi giornalieri:

- 1) polvere totale 6,015 mg/MJ
- 2) sostanze organiche sotto forma di gas e vapori, espresse come COT 6,015 mg/MJ
- 3) cloruro di idrogeno (Hcl) 6,015 mg/MJ
- 4) fluoruro di idrogeno (HF) 0,6015 mg/MJ
- 5) biossido di zolfo (SO₂) 30,075 mg/MJ

| <i>b) valori medi su 30 minuti:</i> | A | B |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|-------------|
| 1) polvere totale | 18,045 mg/MJ | 6,015 mg/MJ |
| 2) sostanze organiche sotto forma di gas e vapori, espresse COT | 12,03 mg/MJ | 6,015 mg/MJ |
| 3) cloruro di idrogeno (HCl) | 36,09 mg/MJ | 6,015 mg/MJ |
| 4) fluoruro di idrogeno (HF) | 2,406 mg/MJ | 1,203 mg/MJ |
| 5) biossido di zolfo (SO ₂) | 120,3 mg/MJ | 30,07 mg/MJ |

c) valori medi durante il periodo di campionamento di 30 minuti come minimo e di 8 ore come massimo

| | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1) cadmio e i suoi composti, espressi come cadmio (Cd) | totale 0,030075 mg/MJ |
| 2) Tallio e i suoi composti, espressi come tallio (Tl) | |
| 3) Mercurio e i suoi composti, espressi come mercurio (Hg) | 0,030075 mg/MJ |
| 4) Antimonio e i suoi composti, espressi come antimonio (Sb) | |
| 5) Arsenico e i suoi composti, espressi come arsenico (As) | |
| 6) Piombo e suoi composti, espressi come piombo (Pb) | |
| 7) Cromo e suoi composti, espressi come (Cr) | |
| 8) Cobalto e suoi composti, espressi come cobalto (Co) | totale 0,30075 mg/MJ |
| 9) Rame e suoi composti, espressi come rame (Cu) | |
| 10) Manganese e suoi composti, espressi come manganese (Mn) | |
| 11) Nichel e suoi composti, espressi come nichel (Ni) | |
| 12) Vanadio e suoi composti, espressi come vanadio (V) | |
| 13) Stagno e suoi composti, espressi come stagno (Sn) | |

Durante il funzionamento degli impianti non devono essere superati i seguenti valori limite nelle emissioni per le concentrazioni di monossido di carbonio (CO), se non diversamente indicato nel suballegato 1:

- 30,075 mg/MJ di gas di combustione determinati come valore medio giornaliero
- 60,15 mg/MJ di gas di combustione di tutte le misurazioni determinate come valori medi su 30 minuti.

Dai calcolati sviluppati nel paragrafo precedente si è ricavato che le emissioni di CO₂ sono pari a 0,1098 kg/MJ. In particolare prendendo dei dati prudenziali si è stimando che l'85% della CO₂ derivi dal legno e che il 15% derivi da composti chimici:

| | |
|--------------------------------------------|----------------|
| - CO ₂ da fonte rinnovabile | 0,09333 kg/MJ; |
| - CO ₂ da fonte non rinnovabile | 0,01647 kg/MJ. |

3. Life Cycle Assessment degli impianti termici alimentati da diversi combustibili

Il Life Cycle Assessment – LCA – è un “processo oggettivo di valutazione dei carichi connesso con un prodotto, un processo od un’attività, attraverso l’identificazione e la quantificazione dell’energia e dei materiali usati o dei rifiuti rilasciati nell’ambiente, per valutare l’impatto di questi usi di energia e di materiali e dei rilasci nell’ambiente e per valutare e realizzare le opportunità di miglioramento ambientale. La valutazione include l’intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, comprendendo l’estrazione ed il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso e il riciclo e lo smaltimento finale” [Se93]. A livello internazionale la metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO 14040 e 14044 del 2006 in base alle quali uno studio di vita prevede le seguenti fasi [De01]:

- *goal e scope definition*, che prevede la definizione dell’obiettivo e del campo di applicazione dell’analisi;
- *inventory analysis*, che prevede la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema, quantificando i flussi di materia e di energia in entrata ed in uscita dalle varie fasi del ciclo di vita;
- *impact assessment*, che prevede la valutazione del potenziale impatto ambientale correlato agli input ed output determinati nella fase precedente di inventario;
- *interpretation*, che prevede l’interpretazione dei risultati che si concretizza nell’esposizione delle valutazioni raggiunte e nella valutazione dell’affidabilità dei risultati.

Il ciclo di vita di un prodotto, processo o attività può essere suddiviso in alcune fasi principali (figura 5) [Ec03]:

- estrazione e trasformazione delle materie prime;
- produzione e assemblaggio;
- utilizzo del prodotto;
- fine vita del prodotto.

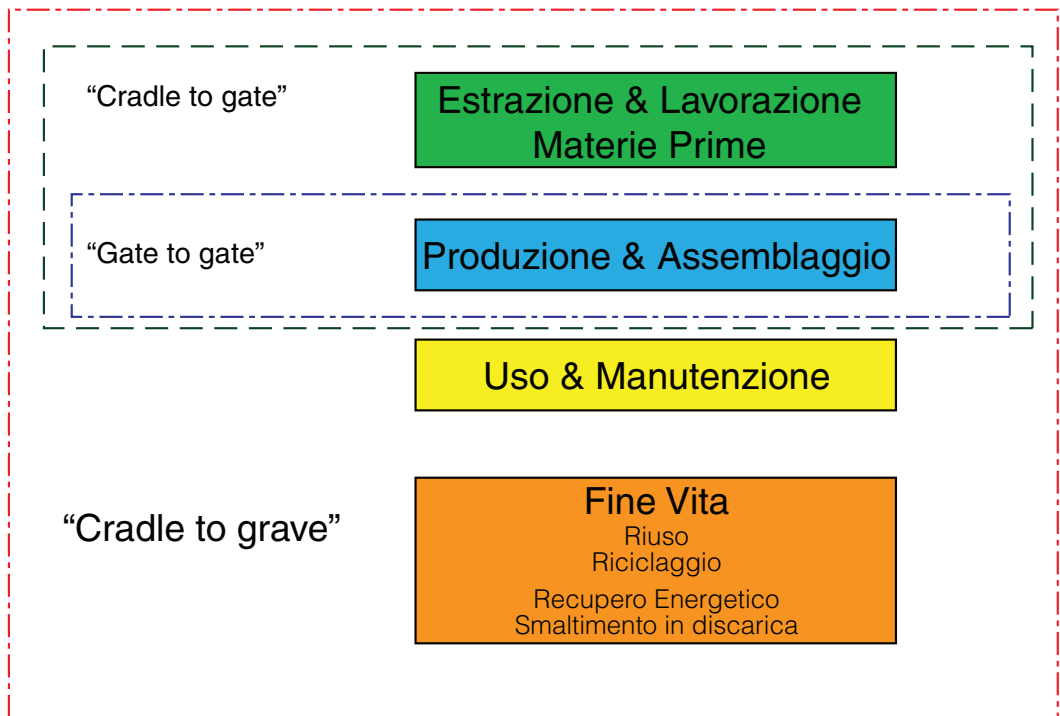


Figura 5. Fasi del ciclo di vita di un prodotto

3.1. Goal and Scope Definition

Le motivazioni che hanno portato alla realizzazione di questo lavoro sono:

- valutare l'impatto ambientale globale conseguente alla produzione di energia termica da impianti alimentati da quattro diversi combustibili (scarti della lavorazione del legno trattati, BTZ, gasolio e metano), considerando anche l'attività di trasporto degli scarti legnosi trattati non utilizzati alle aziende produttrici di pannelli truciolari, l'attività di reintegro dello scarto legnoso bruciato con altro legno da parte delle aziende produttrici degli stessi pannelli, e lo smaltimento di una parte degli scarti legnosi e delle ceneri prodotte dal processo di combustione in discariche controllate;
- effettuare il confronto dell'impatto ambientale globale dei quattro sistemi considerati:
 - a) sistema di combustione a scarto legnoso trattato;
 - b) sistema di combustione a BTZ;
 - c) sistema di combustione a gasolio;
 - d) sistema di combustione a metano;

Le ipotesi di partenza per la valutazione ed il confronto dei quattro sistemi analizzati sono:

- produrre la stessa quantità di energia termica (1 MJ), che costituisce l'unità funzionale di riferimento;

- avere un'uguale quantità di materiale legnoso in ingresso al processo di produzione del pannello truciolare, in modo che la quota parte di scarto legnoso bruciato debba essere reintegrata con altro legno;
- conferire e smaltire un'uguale quantità di scarto legnoso, assimilato ad un rifiuto solido urbano, in discarica controllata (2% sul totale dello scarto legnoso prodotto);
- le emissioni atmosferiche derivanti dalla combustione dei diversi combustibili devono rispettare i limiti legislativi imposti. In particolare, i valori delle emissioni atmosferiche prodotte dalla combustione degli scarti legnosi trattati sono posti pari ai requisiti di cui al D.M. 05.02.1998, punto 6 dell'allegato 2 sub-allegato 1 e 2. Eventuali altre emissioni sono considerate nulle perché ininfluenti ai fini del presente studio;
- ipotizzare che la CO₂ prodotta dalla combustione del solo legno presente negli scarti legnosi trattati, sia assorbita dal ciclo di vita dell'albero in modo tale che presenti un bilancio nullo [AA05] [Bo 97] [Ca06] [De 04] [Ga07] [Wi97];
- gli scarti della lavorazione del legno trattato si riferiscono alla categoria rifiuti CER 030105 come da D.Lgs. 05.02.1997 n. 22 e successive modifiche e sono conformi al D.M. 05.02.1998;
- produrre gli scarti della lavorazione del legno trattato nello stesso luogo in cui saranno poi utilizzati;
- le distanze per il trasporto degli scarti legnosi trattati e delle ceneri derivanti dalla loro combustione sono calcolate come dati medi prendendo a riferimento le realtà produttive del Distretto del Mobile;
- il legno di reintegro che andrebbe a sostituire l'eventuale legno inviato al processo di combustione è dato dal mix di legno riciclato da imballi ed altre lavorazioni, cascami in generale, raccolta differenziata e, in piccolissima parte, da piantagioni dedicate. Si è stimato che la materia prima sostituiva sarebbe approvvigionata in un'area avente un raggio di 300 km con una distanza media di 150 km, che salgono a 300 km se si considera il trasporto in andata e in ritorno. Il trasporto sarebbe prevalentemente su autocarri a tre assi con rimorchio, il cui carico teorico risulta di circa 26 t, mentre quello utile di circa 15 t, tenendo conto del suo peso specifico e del suo caricamento alla rinfusa;
- nel caso di combustione dello scarto legnoso trattato, si stima che il 63% dello stesso sia sottoposto a combustione, il 2% conferito in discarica e il 35% sia trasportato alle aziende produttrici di pannelli truciolari. Nel caso di combustibili fossili, si stima che il 2% dello scarto legnoso trattato sia conferito in discarica e il 98% sia trasportato alle aziende produttrici del pannello truciolare.

Ciascuno dei quattro sistemi analizzati è composto da sotto-sistemi classificabili in quattro categorie:

- approvvigionamento dei combustibili e generazione di energia termica;
- trasporto via gomma degli scarti legnosi del processo di lavorazione e dell'eventuale

legno di reintegro destinati alla produzione di pannelli truciolari o alla discarica controllata;

- smaltimento in discarica controllata degli scarti della lavorazione del legno non riutilizzati e delle eventuali ceneri prodotte dalla combustione dei diversi combustibili;
- ausiliari che comprendono i processi complementari (processi di raffinazione dell'olio combustibile per l'autotrazione e di produzione dell'energia elettrica) ai processi principali.

I quattro sistemi analizzati sono un'integrazione di questi sotto-sistemi opportunamente dimensionati per rispettare il presupposto di produrre la medesima quantità di energia termica, di conferire in discarica controllata la stessa quantità di scarto legnoso e di avere la stessa quantità di materiale legnoso in ingresso al processo di produzione del pannello.

Come unità funzionale si è preso 1 MJ di energia termica prodotta: si confrontano quindi gli impatti ambientali globali dei quattro sistemi in questione (sistema a combustione di scarti di legno trattato, di BTZ, di gasolio e di metano) causati dalla produzione di 1 MJ di energia termica. Per produrre 1 MJ di energia termica occorrono 0,066 kg di scarto legnoso trattato. Sapendo che mediamente un'azienda brucia il 63% del proprio scarto legnoso trattato per soddisfare il fabbisogno termico, si può ricavare il quantitativo di scarto trattato prodotto in totale dalla generica azienda, rispetto all'unità funzionale di 1 MJ di energia termica, che sarà pari a 0,105 kg. Le quantità di scarto che andranno in discarica controllata sono del 2% del totale e quelle che andranno al processo di produzione del pannello truciolare sono del 35% del totale. La quantità di legno di reintegro è posta pari alla quantità di scarto legnoso bruciato. Per i processi che utilizzano i combustibili fossili, una volta determinata, nel processo di combustione dello scarto legnoso la quantità di scarto totale prodotto, si pone che il 98% di tale quantità vada come ingresso al processo della produzione dei pannelli ed il relativo 2% in discarica controllata.

I confini del sistema sono sinteticamente riportati per i quattro sistemi di produzione di energia termica con diversi combustibili in tabella 8, mentre le figure 6, 7, 8 e 9 riportano la schematizzazione delle diverse configurazioni analizzate.

I dati dell'inventario dovranno essere corredati dalle seguenti informazioni:

- rappresentatività temporale;
- rappresentatività geografica;
- rappresentatività tecnologica;
- precisione e riproducibilità dei metodi usati attraverso l'LCA;
- fonti dei dati e loro rappresentatività;
- variabilità ed incertezza delle informazioni e dei metodi.

Infine bisogna assicurarsi che:

- i metodi usati per effettuare l'LCA siano compatibili con gli standard internazionali e siano scientificamente e tecnologicamente validi;
- i dati usati siano approvati allo scopo dello studio;
- le interpretazioni riflettano le limitazioni identificate nella fase di definizione dello scopo dello studio.

| SISTEMI DI GENERAZIONE DI ENERGIA TERMICA ALIMENTATI A DIVERSI COMBUSTIBILI | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| SOTTO-SISTEMI | SCARTO LEGNOSO TRATTATO | BTZ | GASOLIO | METANO |
| Approvvigionamento dei combustibili e di produzione dell'energia termica | Preparazione del materiale | Estrazione, raffinazione e trasporto | Estrazione, raffinazione e trasporto | Estrazione, raffinazione e trasporto |
| | Stoccaggio | Stoccaggio in serbatoi metallici | Stoccaggio in serbatoi metallici | Sistema alimentazione del generatore termico |
| | Sistema alimentazione del generatore termico | Sistema alimentazione del generatore termico | Sistema alimentazione del generatore termico | Generatore termico |
| | Generatore termico | Generatore termico | Generatore termico | Espulsione dei prodotti della combustione |
| | Sistema raccolta delle ceneri | Espulsione dei prodotti della combustione | Espulsione dei prodotti della combustione | Produzione energia elettrica necessari al sotto-sistema |
| | Depurazione ed espulsione dei prodotti della combustione | Produzione energia elettrica necessari al sotto-sistema | Produzione energia elettrica necessari al sotto-sistema | |
| Trasporto degli scarti della lavorazione del legno dalla produzione all'industria dei pannelli e in discarica, del legno di reintegro dell'industria dei pannelli e delle ceneri di combustione alla discarica | Trasporto via gomma | Trasporto via gomma | Trasporto via gomma | Trasporto via gomma |
| Smaltimento in discari-ca controllata degli scarti legnosi e delle ceneri | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) | Discarica controllata di prima categoria per gli scarti legnosi (assimilati agli urbani) |
| | Discarica controllata di seconda categoria (ex 2b) per le ceneri | | | |
| Ausiliari, complementari ai processi | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione | Estrazione, trasporto e raffinazione dell'olio combustibile in gasolio per l'autotrazione |
| | Produzione di energia elettrica necessario al funzionamento del processo di combustione | | | |

Tabella 8. Configurazioni dei sistemi analizzati

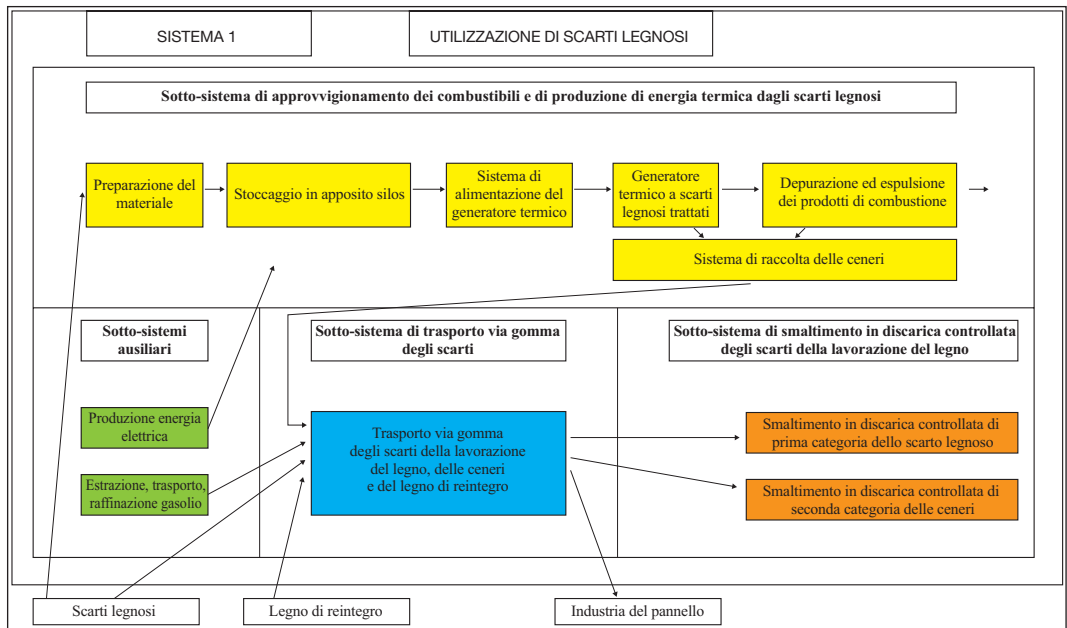


Figura 6. Sistema con produzione di energia termica alimentato a scarto legnoso

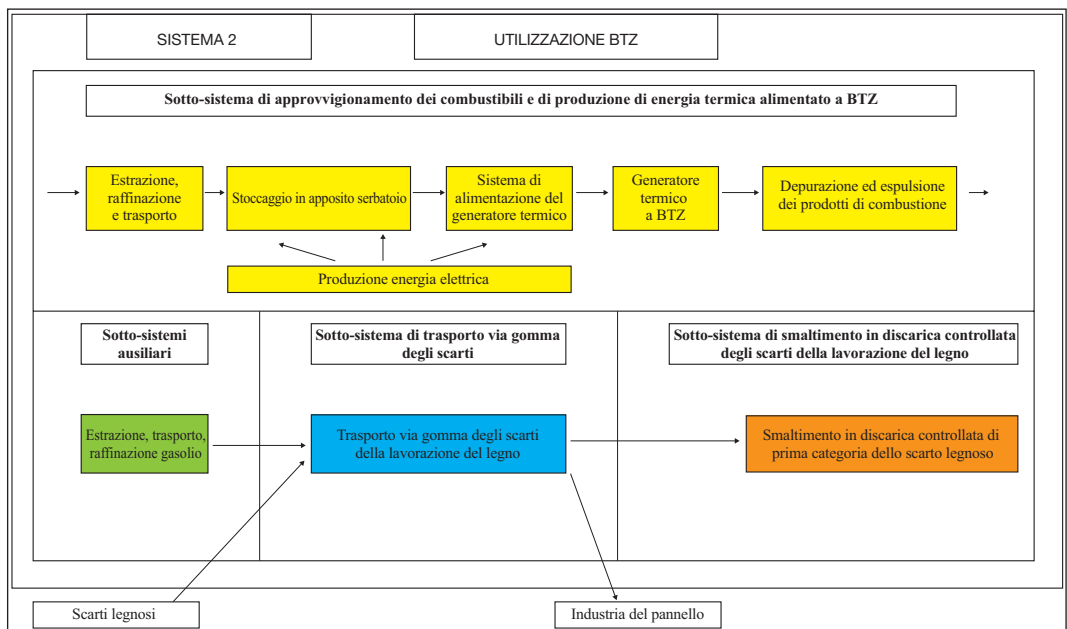


Figura 7. Sistema con produzione di energia termica alimentato a BTZ

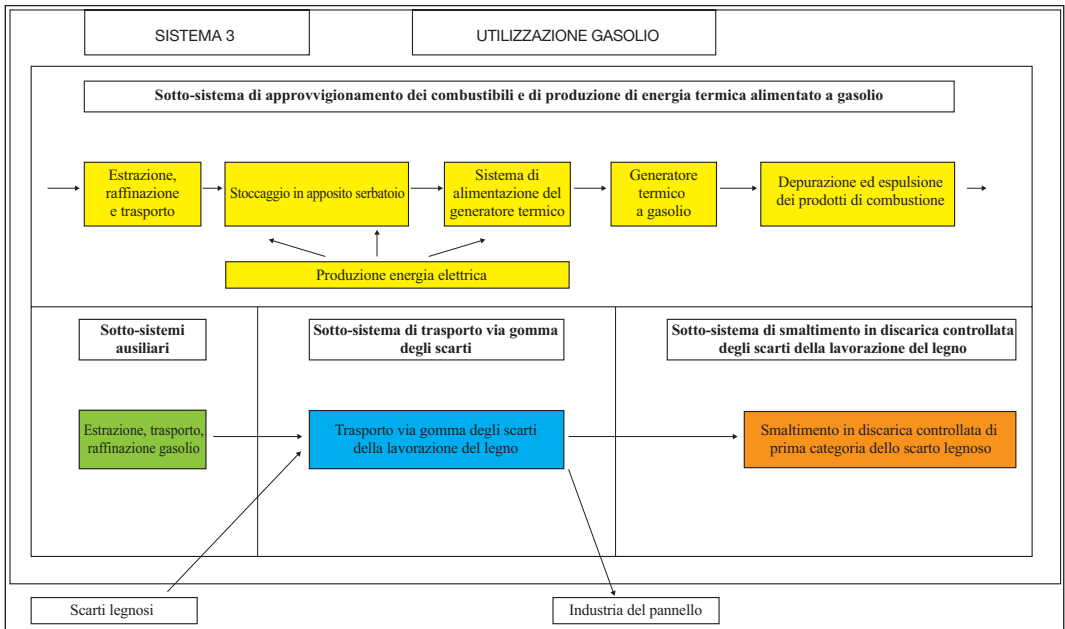


Figura 8. Sistema con produzione di energia termica alimentato a gasolio

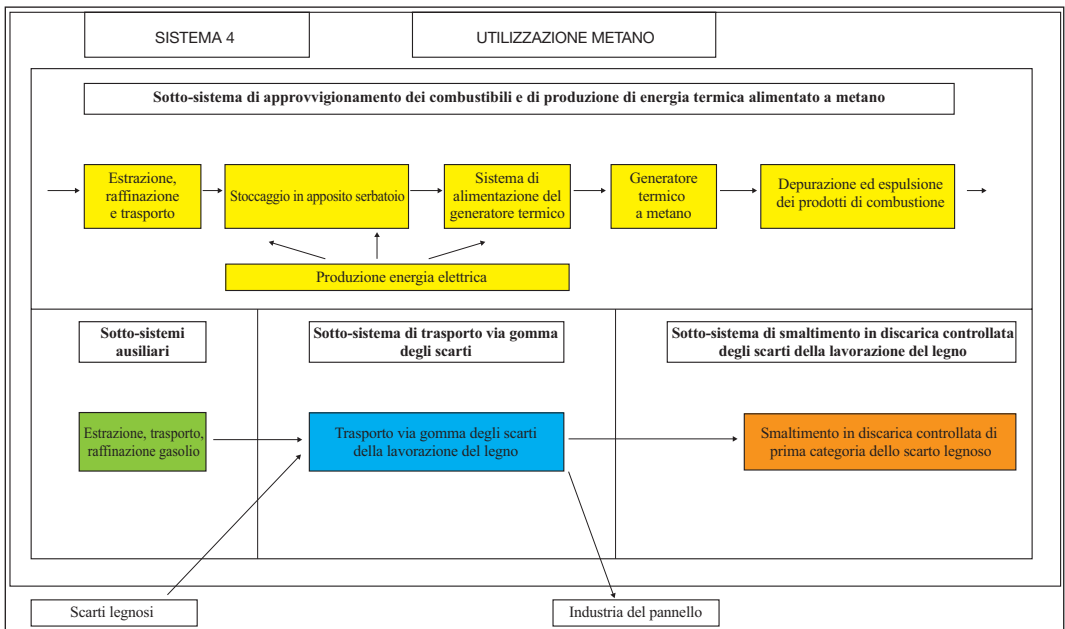


Figura 9. Sistema con produzione di energia termica alimentato a metano

3.2. Inventory Analysis

Nel corso di questa fase si sono analizzati i processi elementari di ogni sistema e, in particolare, sono stati identificati e quantificati i flussi di materia e di energia. Il risultato finale è la redazione della tabella di inventario (*inventory table*), ottenuta attraverso un accurato reperimento dei dati.

3.2.1. Sistema di combustione a scarto legnoso trattato

Il sistema è rappresentato schematicamente in figura 10.

I processi elementari principali sono:

a) generazione di energia termica da scarto legnoso trattato.

Tale processo comprende i seguenti sotto-processi:

- preparazione dei materiali;
- stoccaggio degli scarti della lavorazione del legno;
- sistema di alimentazione del generatore di calore;
- generatore di calore alimentato a scarti legnosi;
- sistema di raccolta delle ceneri;
- sistema di depurazione ed espulsione dei prodotti della combustione.

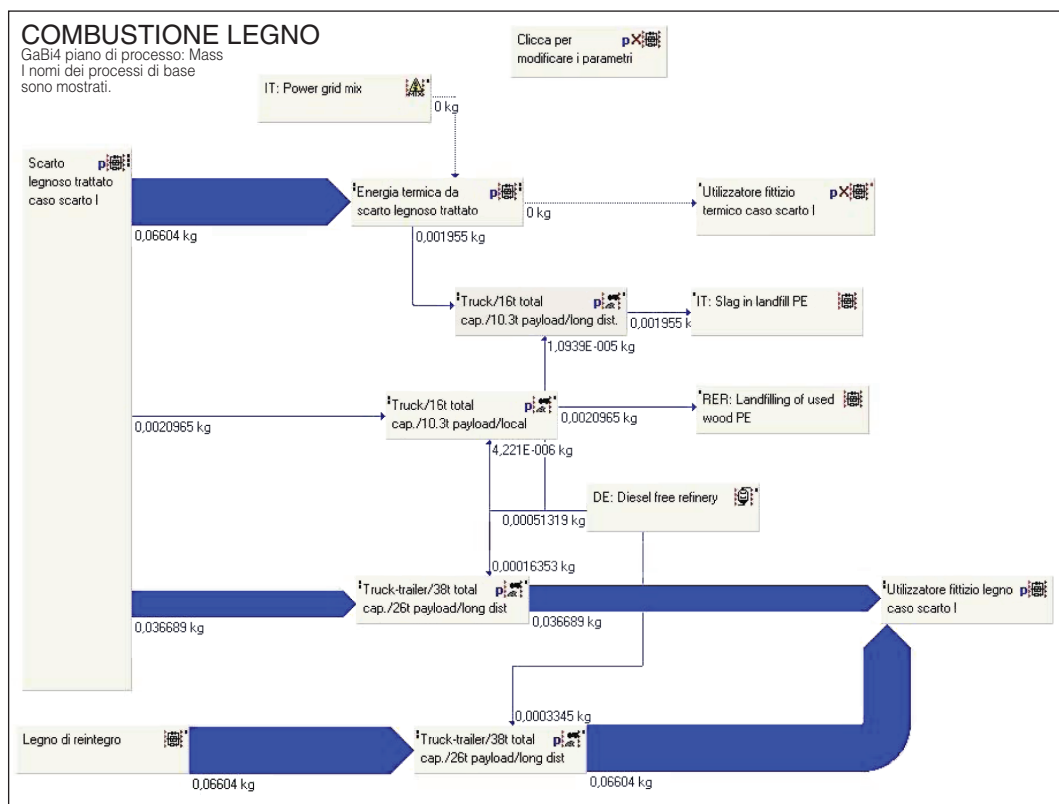


Figura 10. Flussi del sistema di combustione a scarto legnoso

I flussi principali del processo sono (figura 11):

- materie prime e semilavorati: scarto legnoso trattato conforme al D.M. 05.02.1998;
- fonti energetiche: energia elettrica per i sistemi ausiliari del generatore di calore, per i sistemi di preparazione e alimentazione di quest'ultimo e per il sistema di depurazione dei prodotti della combustione;
- emissioni in atmosfera: fissate pari ai limiti imposti dal D.M. 05.02.1998. Si ipotizza che la CO₂ prodotta dalla combustione del solo legno presente negli scarti legnosi trattati sia assorbita nel ciclo di vita dell'albero in modo tale che presenti un bilancio nullo. Le altre eventuali emissioni sono considerate ininfluenti;
- rifiuti solidi: ceneri prodotte dalla combustione degli scarti legnosi trattati;
- prodotti: energia termica espressa in MJ.

L'*inventory table* del processo in questione è riportata in tabella 9.

b) mix di produzione di energia elettrica (*power grid mix*)

Tale processo ha come prodotto l'energia elettrica e comprende tutti i sotto-prodotti necessari per tale produzione. I dati si riferiscono ad un mix delle diverse tipologie di produzione (idroelettrica, da carbone, da olio combustibile, da gas naturale ecc.). Il processo è presente nel database del software utilizzato per la realizzazione del LCA (*Gabi4*);

c) raffinazione del gasolio per autotrazione (*Diesel free refinery*)

Tale processo ha come prodotto il gasolio e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione. Il processo è presente nel database di *Gabi4*;

d) trasporto con autocarro con carico utile teorico di 10,3 t per distanze locali (truck/16 t total cap./10,3 t payload/local)

Tale processo, come pure quelli e) e f), hanno come prodotto il trasporto dello scarto legnoso trattato, del legno di reintegro e delle ceneri prodotte dalla sua combustione. Nei processi di trasporto devono essere impostati i parametri relativi alla distanza del trasporto e al fattore di carico dell'automezzo. Oltre al quantitativo di materiale da trasportare necessitano in ingresso anche di un flusso di gasolio necessario all'alimentazione dei mezzi. I processi sono presenti nel database di *Gabi4*;

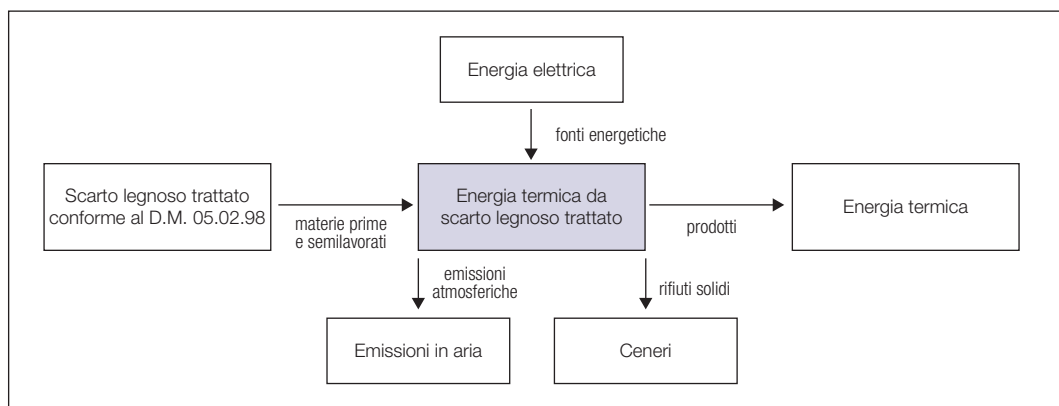


Figura 11. Flussi del sotto-sistema di produzione di energia termica

| Flussi in ingresso | | | |
|------------------------|----------|-----------|-------|
| Flusso | Quantità | Ammontare | Unità |
| Power [Electric power] | Energy | 0,0125 | MJ |
| Wood energy [fuels] | Mass | 0,0660 | kg |

| Flussi in uscita | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|-------|
| Flusso | Quantità | Ammontare | Unità |
| Antimony [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Arsenic [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Cadmium [Heavy metals to air] | Mass | 1,50E-08 | kg |
| Carbon dioxide [Inorganic emissions to air] | Mass | 0,0165 | kg |
| Carbon monoxide [Inorganic emissions to air] | Mass | 6,02E-05 | kg |
| Chromium (unspecified) [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Cobalt [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Copper [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Dust (unspecified) [Particles to air] | Mass | 6,02E-06 | kg |
| Hydrogen chloride [Inorganic emissions to air] | Mass | 6,02E-06 | kg |
| Hydrogen fluoride [Inorganic emissions to air] | Mass | 1,20E-06 | kg |
| Lead [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Manganese [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Mercury [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Nickel [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air] | Mass | 2,41E-04 | kg |
| Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (2,3,7,8 - TCDD) [Organic emissions to air] | Mass | 6,02E-14 | kg |
| Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) [Group PAH to air] | Mass | 6,02E-09 | kg |
| Slag [Waste for recovery] | Mass | 1,96E-03 | kg |
| Sulphur dioxide [Inorganic intermediate products] | Mass | 3,01E-05 | kg |
| Thallium [Heavy metals to air] | Mass | 1,50E-08 | kg |
| Thermal energy (MJ) scarto [Thermal energy] | Energy | | 1MJ |
| Tin [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| Vanadium [Heavy metals to air] | Mass | 3,01E-08 | kg |
| VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)] | Mass | 8,15E-06 | kg |

Tabella 9. Inventory table del processo di produzione di energia termica

- e) trasporto con autocarro con carico utile teorico di 10,3 t per distanze lunghe (truck/16 t total cap./10,3 t payload/long dist.);
- f) trasporto con autocarro con rimorchio con carico utile teorico di 26 t per distanze lunghe (truck/38 t total cap./26 t payload/long dist.);
- g) discarica per scarto legnoso trattato (*landfill of used wood*)
Tale processo, assieme a quello h), ha come prodotto lo stoccaggio in discarica di una quota parte di scarto legnoso, mentre in h) quello delle ceneri del suo processo di combustione. I processi sono presenti nel database di *Gabi4*;
- h) discarica per le ceneri (*slag in landfill*).
Gli altri processi presenti (scarto legnoso trattato caso scarto 1, utilizzatore fittizio termico caso scarto 1, legno di reintegro caso scarto 1, utilizzatore fittizio legno caso

scarto 1 e “clicca per modificare i parametri”) sono dei processi fittizi, con uguale input e output e sono solo utili per la ripartizione e regolazione dei flussi nel sistema in esame. Non fanno propriamente parte del sistema studiato e non sono conteggiati nei calcoli del LCA.

3.2.2. Sistema di combustione a gasolio

Il sistema è rappresentato schematicamente in figura 12. I processi elementari principali sono:

- i) generazione di energia termica da gasolio (*thermal energy from Diesel oil*)
Tale processo ha come prodotto l'energia termica e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione (estrazione, raffinazione, trasporto, alimentazione, generazione di energia termica e produzione di energia elettrica necessaria al processo). Il processo è stato approssimato prendendo a riferimento il processo “*Thermal energy from light fuel oil (0,2% S)*” presente nel database di *Gabi4*;
- j) raffinazione del gasolio per autotrazione (*Diesel free refinery*).
Tale processo ha come prodotto il gasolio e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione. Il processo è presente nel database di *Gabi4*;
- k) trasporto con autocarro con carico utile teorico di 10,3 t per distanze locali (truck/16 t total cap./10,3 t payload/local).
Tale processo, come quello d), ha come prodotto il trasporto dello scarto legnoso trattato. Nei processi di trasporto devono essere impostati i parametri relativi alla distanza del trasporto e al fattore di carico dell'automezzo. Oltre al quantitativo di materiale da trasportare questi processi necessitano in ingresso anche di un flusso di gasolio necessario all'alimentazione dei mezzi. I processi sono presenti nel database di *Gabi4*;

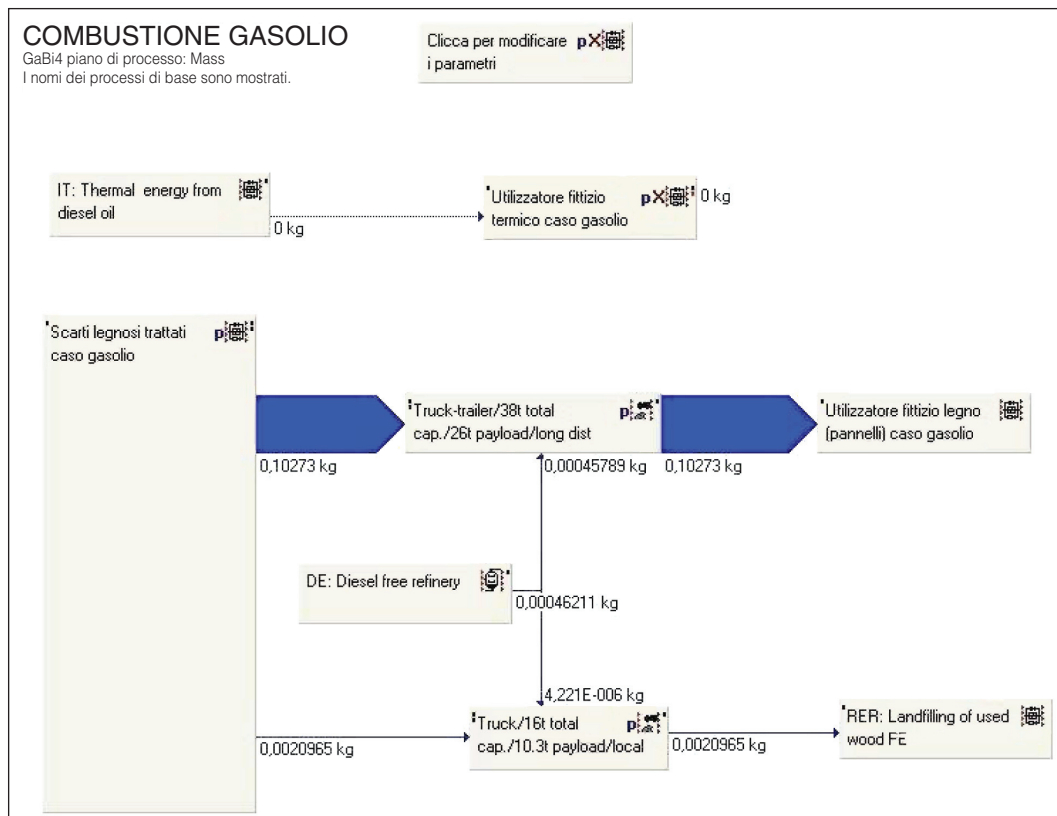


Figura 12. Flussi del sistema di combustione a gasolio

- l) trasporto con autocarro con rimorchio con carico utile teorico di 26 t per distanze lunghe (truck/38 t total cap./26 t payload/long dist.);
- m) scarica per scarto legnoso trattato (*landfill of used wood*)

Tale processo ha come prodotto lo stoccaggio in discarica di una quota parte di scarto legnoso. Il processo è presente nel database di *Gabi4*.

Gli altri processi presenti (scarto legnoso trattato caso gasolio, utilizzatore fittizio termico caso gasolio, utilizzatore fittizio legno caso gasolio ecc.) sono dei processi fittizi, con uguale input e output e sono solo utili per la ripartizione e regolazione dei flussi nel sistema in esame. Non fanno propriamente parte del sistema studiato e non sono conteggiati nei calcoli del LCA.

3.2.3. Sistema di combustione a BTZ

Il sistema è rappresentato schematicamente in figura 13.

I processi elementari principali sono:

- n) generazione di energia termica da BTZ (*thermal energy from BTZ*).

Tale processo ha come prodotto l'energia termica e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione (estrazione, raffinazione, trasporto, alimentazione,

generazione di energia termica e produzione di energia elettrica necessaria al processo).

Il processo è stato approssimato prendendo a riferimento il processo “*Thermal energy from heavy fuel oil (1% S)*” presente nel database di *Gabi4*;

- o) raffinazione del gasolio per autotrazione (*Diesel free refinery*)

Tale processo ha come prodotto il gasolio e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione. Il processo è presente nel database di *Gabi4*;

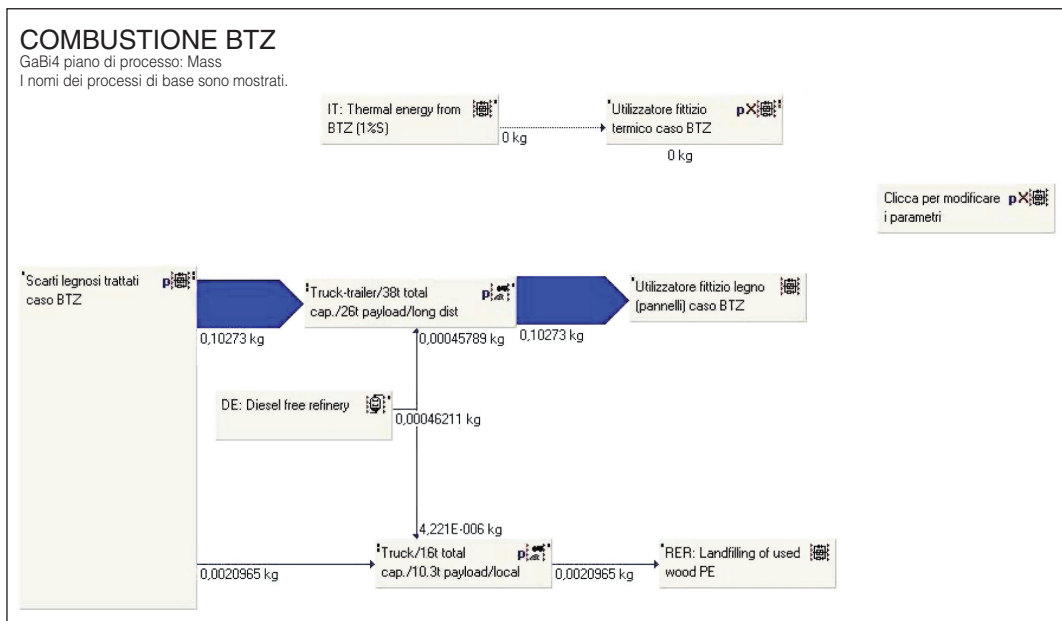


Figura 13. Flussi del sistema di combustione a BTZ

- p) trasporto con autocarro con carico utile teorico di 10,3 t per distanze locali (truck/16 t total cap./10,3 t payload/local)

Tale processo, come quello d), ha come prodotto il trasporto dello scarto legnoso trattato. Nei processi di trasporto devono essere impostati i parametri relativi alla distanza del trasporto e al fattore di carico dell'automezzo. Oltre al quantitativo di materiale da trasportare questi processi necessitano in ingresso anche di un flusso di gasolio necessario all'alimentazione dei mezzi. I processi sono presenti nel database di *Gabi4*;

- q) trasporto con autocarro con rimorchio con carico utile teorico di 26 t per distanze lunghe (truck/38 t total cap./26 t payload/long dist.);

- r) discarica per scarto legnoso trattato (*landfill of used wood*).

Tale processo ha come prodotto lo stoccaggio in discarica di una quota parte di scarto

legnoso. Il processo è presente nel database di *Gabi4*.

Gli altri processi presenti (scarto legnoso trattato caso BTZ, utilizzatore fittizio termico caso BTZ, utilizzatore fittizio legno caso BTZ ecc.) sono dei processi fittizi, non fanno propriamente parte del sistema studiato e non sono conteggiati nei calcoli del LCA.

3.2.4. Sistema di combustione a metano

Il sistema è rappresentato schematicamente in figura 14. I processi elementari principali sono:

- s) generazione di energia termica da metano (*thermal energy from natural gas*).
Tale processo ha come prodotto l'energia termica e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione (estrazione, trasporto ecc.). Il processo è presente nel database di *Gabi4*;

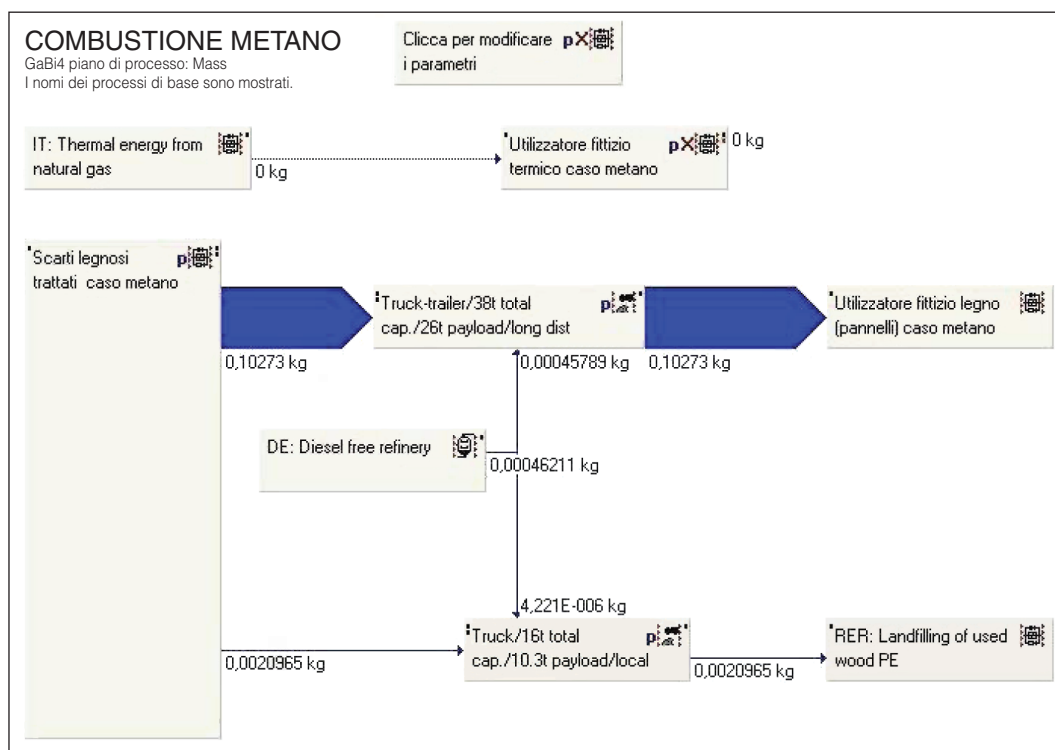


Figura 14. Flussi del sistema di combustione a metano

- t) raffinazione del gasolio per autotrazione (*Diesel free refinery*).
Tale processo ha come prodotto il gasolio e comprende tutti i sotto-processi necessari a tale produzione. Il processo è presente nel database di *Gabi4*;
- u) trasporto con autocarro con carico utile teorico di 10,3 t per distanze locali (truck/16 t total cap./10,3 t payload/local)

Tale processo, come quello in d), ha come prodotto il trasporto dello scarto legnoso trattato. Nei processi di trasporto devono essere impostati i parametri relativi alla distanza del trasporto e al fattore di carico dell'automezzo. Oltre al quantitativo di materiale da trasportare questi processi necessitano in ingresso anche di un flusso di gasolio necessario all'alimentazione dei mezzi. I processi sono presenti nel database di *Gabi4*;

- v) trasporto con autocarro con rimorchio con carico utile teorico di 26 t per distanze lunghe (truck/38 t total cap./26 t payload/long dist.);
- w) discarica per scarto legnoso trattato (*landfill of used wood*).

Tale processo ha come prodotto lo stoccaggio in discarica di una quota parte di scarto legnoso. Il processo è presente nel database di *Gabi4*.

Gli altri processi presenti (scarto legnoso trattato caso metano, utilizzatore fittizio termico caso metano, utilizzatore fittizio legno caso metano ecc.) sono dei processi fittizi, con uguale input e output e sono solo utili per la ripartizione e regolazione dei flussi nel sistema in esame. Non fanno propriamente parte del sistema studiato e non sono conteggiati nei calcoli del LCA.

3.3. Impact Assessment

L'*impact assessment* è la procedura di valutazione degli impatti potenziali o presenti nell'ambiente. Essa consiste nel correlare i dati fisici trovati nella fase di Inventario con gli impatti ambientali generati a seguito di rilasci e di consumi di risorse provocati dai processi in esame. Gli step principali comuni ad ogni metodo sono [Se93]:

- classificazione e caratterizzazione (*classification and characterization*);
- normalizzazione (*normalization*);
- valutazione o ponderazione (*evaluation*).

Nella prima fase, tutti gli impatti sono classificati a seconda degli effetti che essi hanno sull'ambiente. Gli impatti che, ad esempio, contribuiscono all'effetto serra sono raggruppati in un'unica categoria, così come gli impatti che contribuiscono al danno sullo strato di ozono ecc.. Le categorie di aggregazione più comunemente utilizzate sono:

- consumo di risorse: rinnovabili e non rinnovabili;
- inquinamento: effetto serra, danno della fascia di ozono, tossicità per l'uomo, ecotossicità, formazione di composti ossidanti da processo fotochimico, acidificazione e eutrofizzazione;
- degrado dell'ecosistema: uso del territorio.

Non è sufficiente sommare le quantità delle diverse sostanze raggruppate in una categoria per ottenere il valore complessivo d'impatto; alcune sostanze possono essere infatti più dannose di altre all'interno di una stessa categoria. Vengono, quindi, applicati dei coefficienti volti a conferire il giusto "peso" alle diverse sostanze, costruendo così degli indici di impatto ambientale (fase di caratterizzazione). Se infatti si considera l'indicatore

inerente l'effetto serra, esso viene calcolato considerando, tra le sostanze emesse in aria, quelle che contribuiscono al potenziale riscaldamento globale del pianeta. La quantità in massa di ciascuna sostanza viene moltiplicata per un coefficiente di peso, chiamato potenziale di riscaldamento globale (GWP, *Global Warming Potential*). Sommando i contributi pesati delle varie sostanze si ottiene il valore aggregato dell'indicatore. La CO₂ è la sostanza di riferimento per questo indicatore, vale a dire il suo coefficiente di peso è uguale a 1 e i valori dell'indicatore sono espressi in grammi di CO₂ equivalente [Sc03]. La struttura dei modelli di calcolo di tutti gli altri indicatori selezionati è simile a quella appena descritta per l'effetto serra e permettono di determinare il punteggio finale (*effect score*) [De01].

Nella fase di normalizzazione gli effetti vengono divisi per una quantità definita che può essere l'effetto equivalente causato da una persona media in un giorno o l'effetto equivalente determinato in un'area geografica in un giorno, in modo da poter stabilire la magnitudo di ciascun effetto ambientale rispetto ad un valore di riferimento. La normalizzazione dei valori di impatto, ottenuti dalla caratterizzazione delle sostanze analizzate, è fatta su base mondiale oppure europea. In questa fase non è ancora possibile fare un confronto diretto tra le diverse categorie di impatto.

Infine l'obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un unico valore numerico, l'impatto ambientale associato ad un prodotto nell'arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono moltiplicati per dei "fattori di peso" che esprimono l'importanza, intesa come critica, che viene attribuita a ciascun problema ambientale (categoria di impatto) [Mo05]. Questi step sono influenzati dal tipo di metodo di valutazione adottato e da esso dipendono i risultati finali. Infatti, ciascuno fa uso di specifici fattori di caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione e considera determinati temi ambientali, in quanto allo stato attuale non esiste un riferimento standard [Mo05]. I due metodi di valutazione degli impatti adottati nel presente lavoro sono:

- CML 2001;
- Eco-Indicator '99.

3.3.1 Il metodo CML 2001

Il metodo CML 2001 è stato sviluppato dal *Centre of Environmental Science* (CML) dell'Università di Leiden (Germania). Nelle fasi di classificazione e caratterizzazione, le categorie ambientali considerate sono [Mo05]:

- esaurimento delle risorse naturali: tale fattore determina l'effetto dell'estrazione del minerale e del combustibile fossile (espresso in kg Antimonio equivalente/kg estrazione) ed è un problema a scala globale;
- cambiamento climatico: il modello di caratterizzazione sviluppato dal *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) è quello selezionato per lo sviluppo dei fattori di caratterizzazione. Questi fattori sono espressi in termini di riscaldamento globale in 100 anni (GWP 100) valorizzato come kg CO₂/kg emissione; è un problema a scala globale;

- esaurimento dell'ozono stratosferico: a causa dell'esaurimento dello stato di ozono, una grande frazione di radiazioni UV-B raggiunge la superficie della terra e può avere effetti dannosi sulla salute umana, la salute della fauna e sull'ecosistema terrestre ed acquatico. Il modello è stato sviluppato dalla *World Meteorological Organization* (WMO) e definisce il potenziale di esaurimento dello strato di ozono di differenti gas (kg CFC-11 equivalente/kg emissione). È un problema a scala globale;
- tossicità umana: è una categoria che riguarda gli effetti delle sostanze tossiche sull'uomo. I rischi della salute dovuti all'esposizione in ambiente di lavoro non sono considerati. I fattori di caratterizzazione e i potenziali di tossicità umana (*Human Toxicity Potential* - HTP) sono espressi in 1,4-diclorobenzene equivalente/kg emissione. La scala varia tra il locale e il globale;
- ecotossicità in acqua dolce: si riferisce all'impatto sull'ecosistema, come conseguenza dell'emissione di sostanze tossiche in atmosfera, in acqua e nel suolo. Il potenziale di ecotossicità (FAETP) è calcolato sulla base dell'esposizione e degli effetti delle sostanze tossiche. I fattori di caratterizzazione sono espressi in 1,4-diclorobenzene equivalente/kg emissione. La scala è globale-continentale-regionale;
- ecotossicità marina: si riferisce all'impatto delle sostanze tossiche sull'ecosistema marino;
- ecotossicità terrestre: si riferisce all'impatto delle sostanze tossiche sull'ecosistema terrestre;
- ossidazione fotochimica: è la formazione di sostanze reattive, principalmente ozono, che incidono sulla salute umana e sull'ecosistema e che possono danneggiare i raccolti ("smog estivo"). Lo smog invernale non rientra in questa categoria. Il potenziale di creazione fotochimica di ozono (POCP) per le emissioni di sostanze in atmosfera è calcolato con il modello "*UNECE Trajector*" ed è espresso in kg etilene equivalenti/kg emissione. La scala del problema varia da quella locale a quella continentale;
- acidificazione: le sostanze acidificanti causano una vasta serie di impatti sul suolo, l'acqua sotterranea, l'acqua superficiale, gli organismi, gli ecosistemi e i materiali (edifici). Il potenziale di acidificazione (AP) per le emissioni in atmosfera è calcolato con il modello adattato *RAINS 10*, che descrive il destino e la deposizione delle sostanze acidificanti. AP è espresso in kg SO₂ equivalenti/kg emissione. La scala varia da quella locale a quella continentale;
- eutrofizzazione: include tutti gli impatti dovuti all'alto livello di concentrazione di macronutrienti nell'ambiente, causato dalle emissioni in atmosfera, in acqua e nel suolo. Il potenziale di eutrofizzazione (EP) è espresso in kg di P equivalenti/kg emissioni. La scala varia da quella locale a quella continentale;
- radiazioni radioattive: tale fattore determina i rischi di esposizione a sostanze radioattive ed è espresso dal DAILY (*Disability Adjusted Life Years*).

Per quanto riguarda la normalizzazione, il relativo fattore si riferisce all'effetto equivalente determinato nell'area geografica dell'Europa in un giorno. I fattori di normalizzazione sono stati calcolati per le seguenti situazioni di riferimento: Australia, Canada, Europa, Germania, Giappone, Olanda, Nord America, Usa, World e West Europe. Nella fase di valutazione, i relativi valori normalizzati devono essere moltiplicati per opportuni coefficienti di peso che rappresentano la percezione, da parte della popolazione campione, dell'entità del danno provocato dalle diverse categorie. Gli indici di valutazione esistenti sono: Experted IKP Central Europe, Experted IKP Northern Europe e Experted IKP Southern Europe. Nel presente studio nella fase di normalizzazione si è utilizzato l'indice CML 2001, Europe, mentre in quella di valutazione si è impiegato l'indice CML 2001, Experted IKP Southern Europe.

Va specificato che l'indice di valutazione CML 2001, Experted IKP non considera tutte le categorie presenti a livello di classificazione e sopra enunciate ma solo le seguenti: radiazioni radioattive, ossidazione fotochimica, esaurimento dell'ozono stratosferico, cambiamento climatico, eutrofizzazione, acidificazione, esaurimento delle risorse naturali. Le categorie di impatto relative alla tossicità umana ed all'ecotossicità non sono univocamente riconosciute e la loro applicazione non è molto diffusa in ambito industriale. Per questo motivo non sono state considerate nella fase di definizione dei fattori di ponderazione (valutazione) da parte di LBP (ex-IKP).

I risultati sono divisi in base agli impatti ambientali associati ai flussi in input e in output. In input si hanno solo gli impatti dovuti all'esaurimento delle risorse naturali, mentre in output si hanno gli impatti associati alle emissioni e ai rifiuti prodotti dai processi in esame. In figura 15 sono riportati i dati caratterizzati dei quattro sistemi a confronto, mentre in figura 16 sono riportati i dati caratterizzati e normalizzati. L'ecotossicità marina risulta elevata nel sistema di combustione a scarti legnosi trattati a causa delle emissioni di fluoruro di idrogeno ammesse dal D.M. 05.02.1998.

Nelle figure 17, 18 e 19 sono riportati i risultati finali, cioè i dati caratterizzati, normalizzati e valorizzati dei quattro sistemi analizzati. Si nota che il sistema di combustione a scarto legnoso trattato ha un impatto ambientale minore dei sistemi a combustione fossile. A livello crescente di impatto seguono il sistema di combustione a metano, quello a gasolio e quello a BTZ. Nelle figure 20, 21, 22 e 23 sono riportati i risultati finali in percentuale relativi alle categorie di impatto per ogni sistema analizzato. Come si nota, a livello di ogni singolo sistema, gli impatti di maggior rilevanza si hanno nella categoria potenziale di riscaldamento globale.

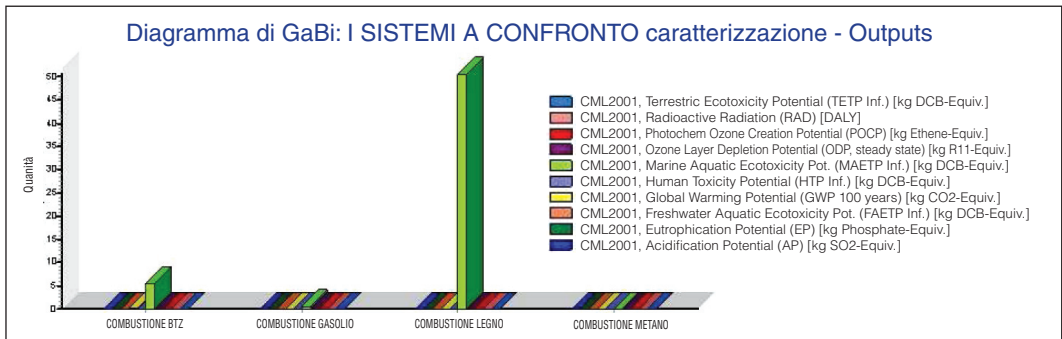


Figura 15. Risultati della caratterizzazione (CML2001)

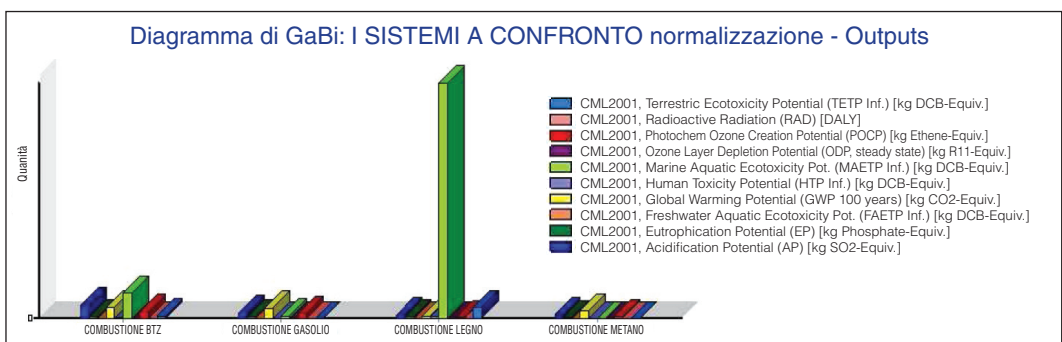


Figura 16. Risultati della normalizzazione (CML2001)

Risultati della Valutazione (CML 2001)

Visualizzazione bilancio: cml 2001 VALUTAZIONE

Flussi in ingresso

| | COMBUSTIONE BTZ | COMBUSTIONE GASOLIO | COMBUSTIONE LEGNO | COMBUSTIONE METANO |
|-----------------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| CML2001, Experts IKP (Southern Europe) | 4,16E-14 | 4,29E-14 | 2,00E-15 | 3,84E-14 |
| CML2001, Abiotic Depletion (ADP) | 4,16E-14 | 4,29E-14 | 2,00E-15 | 3,84E-14 |

Flussi in uscita

| | COMBUSTIONE BTZ | COMBUSTIONE GASOLIO | COMBUSTIONE LEGNO | COMBUSTIONE METANO |
|-----------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| CML2001, Experts IKP (Southern Europe) | 2,10E-13 | 1,86E-13 | 6,59E-14 | 1,30E-13 |
| CML2001, Acidification Potential (AP) | 1,87E-14 | 7,92E-15 | 6,37E-15 | 4,90E-15 |
| CML2001, Eutrophication Potential (EP) | 1,37E-14 | 1,36E-14 | 1,57E-14 | 1,07E-14 |
| CML2001, Global Warming Potential (GWP 100 years) | 1,50E-13 | 1,41E-13 | 3,94E-14 | 1,08E-13 |
| CML2001, Ozone Layer Depletion Potential (ODP) | 1,93E-16 | 1,99E-16 | 1,64E-17 | 1,04E-17 |
| CML2001, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) | 2,76E-14 | 2,29E-14 | 4,37E-15 | 6,45E-15 |
| CML2001, Radioactive Radiation (RAD) | 1,76E-18 | 1,77E-18 | 2,58E-17 | 1,57E-18 |

TOTALE

| | COMBUSTIONE BTZ | COMBUSTIONE GASOLIO | COMBUSTIONE LEGNO | COMBUSTIONE METANO |
|--|------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| | 2,52E-013 | 2,29E-013 | 6,79E-014 | 1,69E-013 |



Figura 17. Risultati della valutazione – input (CML2001)

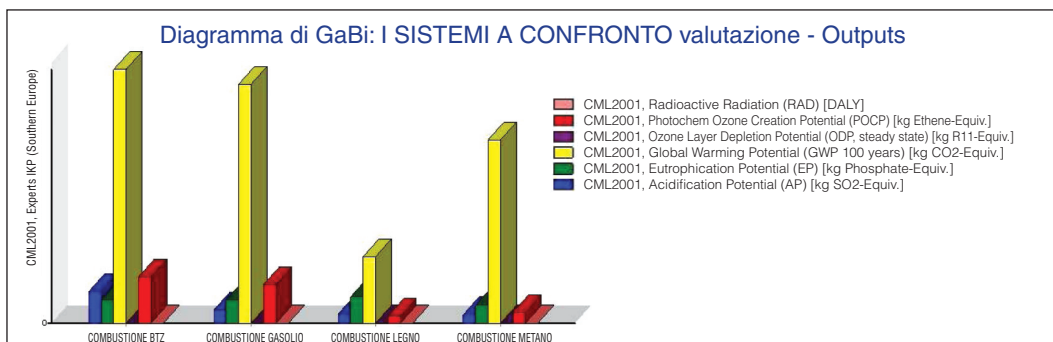


Figura 18. Risultati della valutazione – output (CML2001)

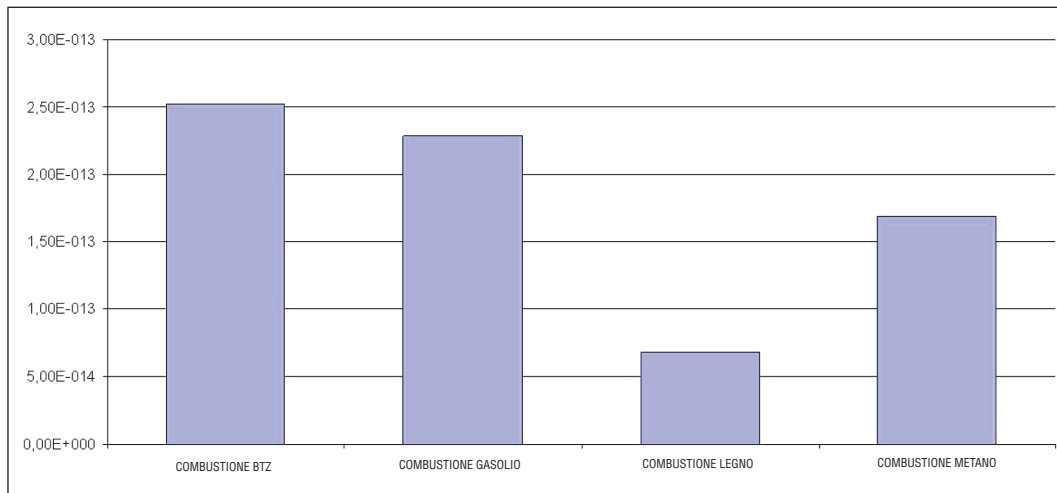


Figura 19. Risultati della valutazione (CML2001)

Infine nelle figure 24, 25, 26 e 27 sono riportati i risultati finali degli impatti per ogni processo di ogni singolo sistema. Come si nota, la maggior parte degli impatti sono dovuti al processo di combustione e in minima parte ai processi di trasporto in generale e di smaltimento dei materiali che vanno in discarica controllata.

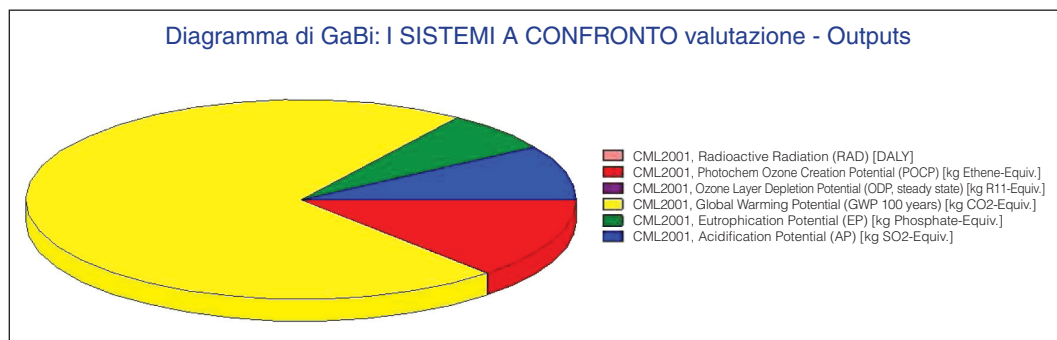


Figura 20. Combustione a BTZ (CML2001)

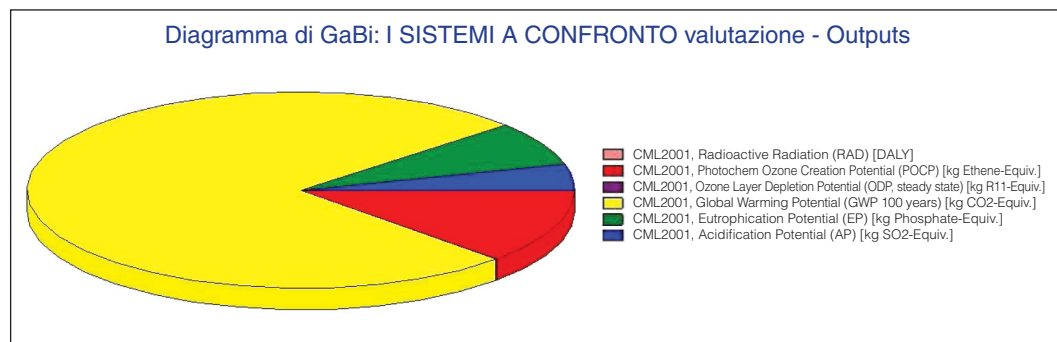


Figura 21. Combustione a gasolio (CML2001)

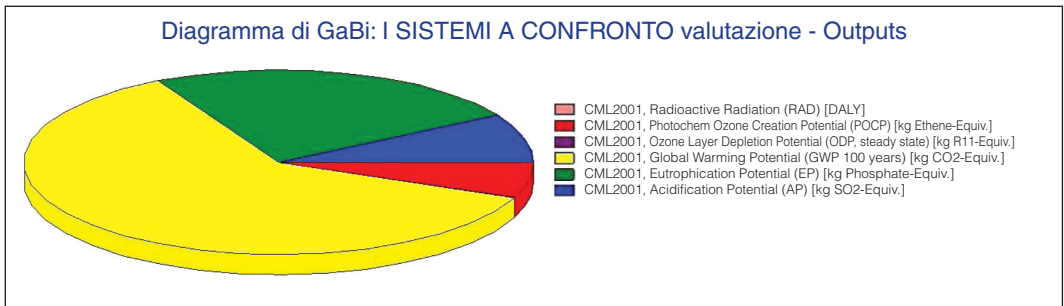


Figura 22. Combustione a scarto legnoso (CML2001)

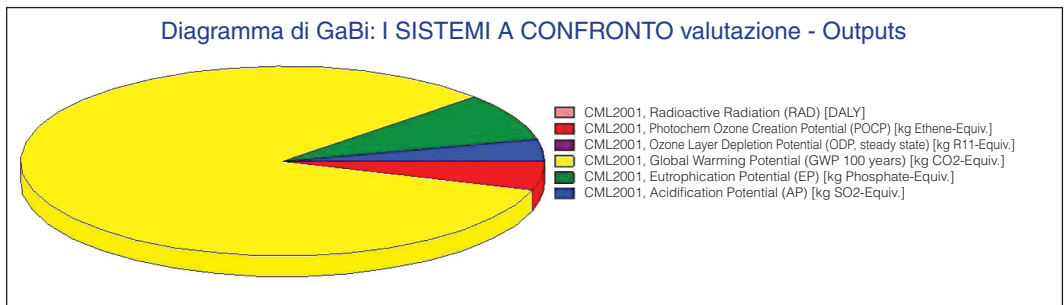


Figura 23. Combustione a metano (CML2001)

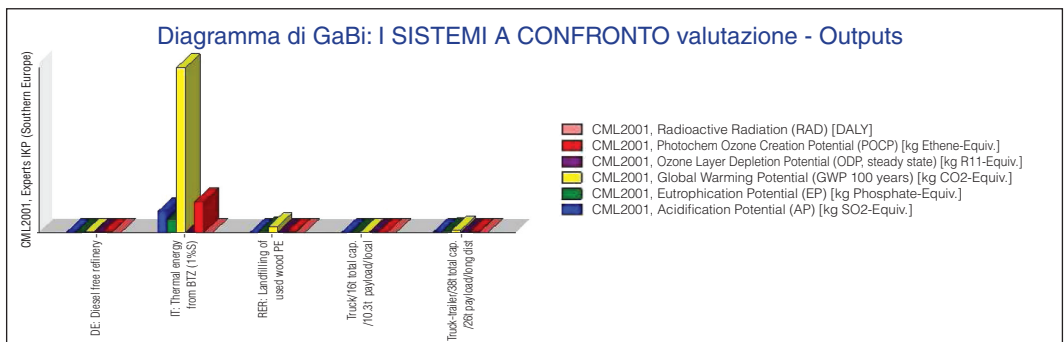
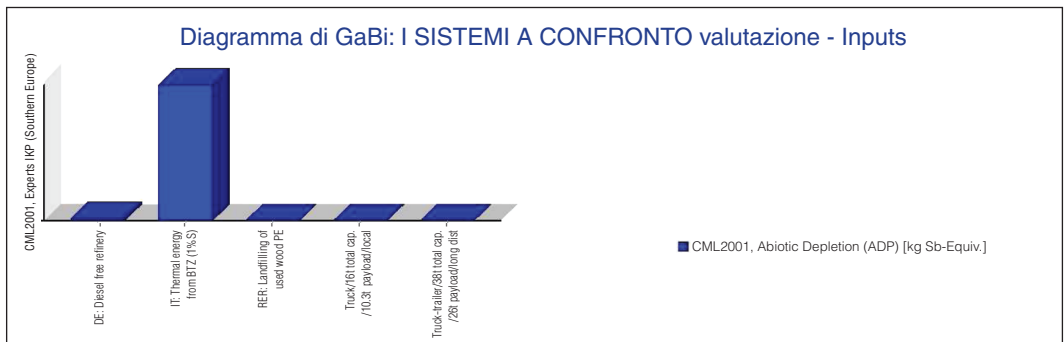


Figura 24. Sistema di combustione a BTZ – risultati finali (CML2001)

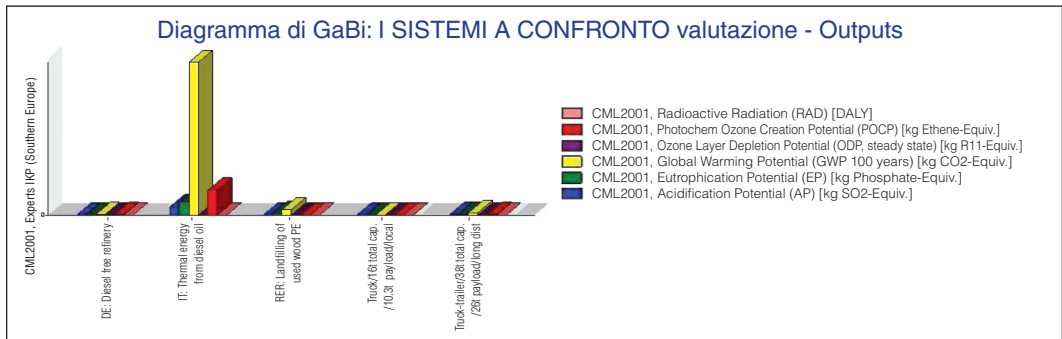
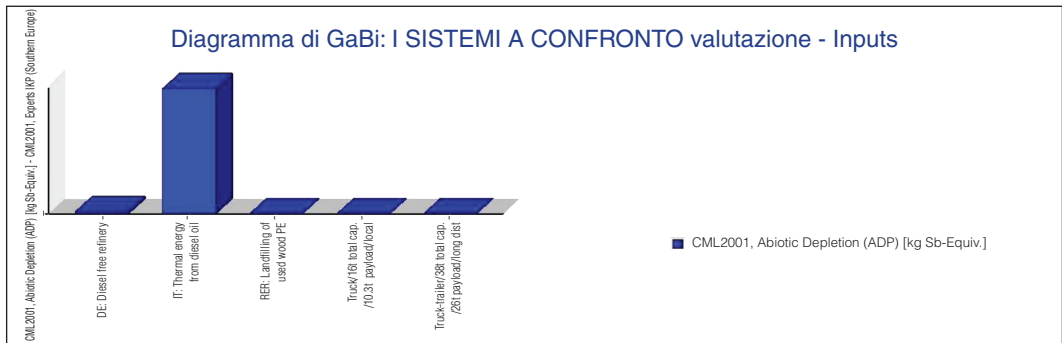


Figura 25. Sistema di combustione a gasolio – risultati finali (CML2001)

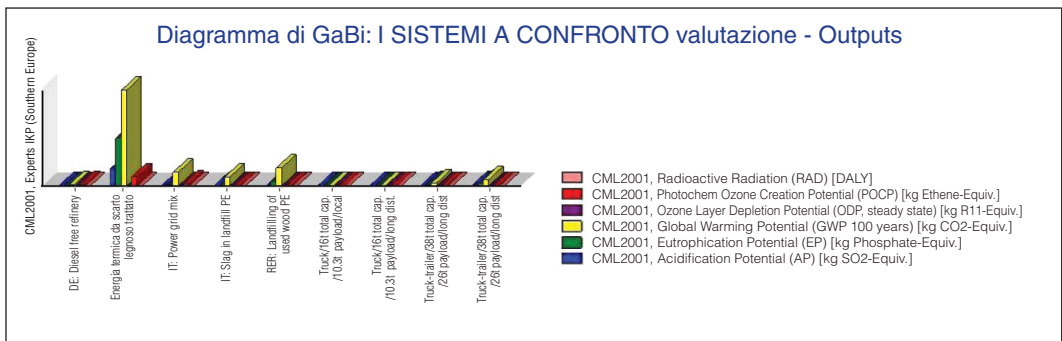


Figura 26. Sistema di combustione a scarto legnoso trattato – risultati finali (CML2001)

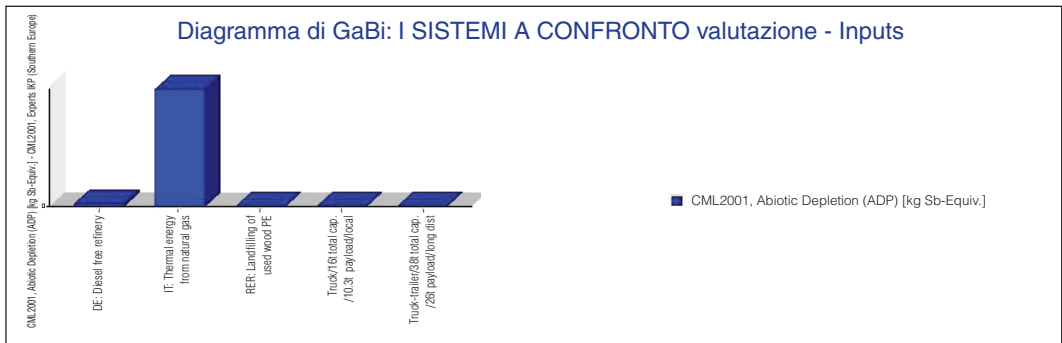


Figura 27. Sistema di combustione a metano – risultati finali (CML2001)

3.3.2 Il metodo Eco-Indicator '99

Il metodo Eco-Indicator '99 impiega alcune “funzioni di danno” (*damage function*) che definiscono la relazione esistente tra il valore d’impatto e il danno alla salute umana o all’ecosistema. La struttura generale del metodo è illustrata in figura 28 [De01].

Per quanto riguarda la classificazione e la caratterizzazione, le categorie d’impatto sono tre:

- categoria di danno: salute umana (*Human Health*).

La salute dell’individuo può essere compromessa nei termini di morte prematura o di invalidità permanenti o temporanee; allo stato attuale delle conoscenze, le principali fonti ambientali di danno alla salute umana risultano:

- malattie infettive, disturbi al sistema respiratorio e a quello cardiovascolare, necessità di spostamento a causa delle variazioni climatiche;
- malattie tumorali imputabili alle radiazioni ionizzanti;
- malattie tumorali e danni all’apparato visivo dovuti alla diminuzione dello strato di ozono;
- disturbi respiratori e tumori dovuti alla presenza di composti chimici tossici nell’aria, nell’acqua potabile e nei cibi.

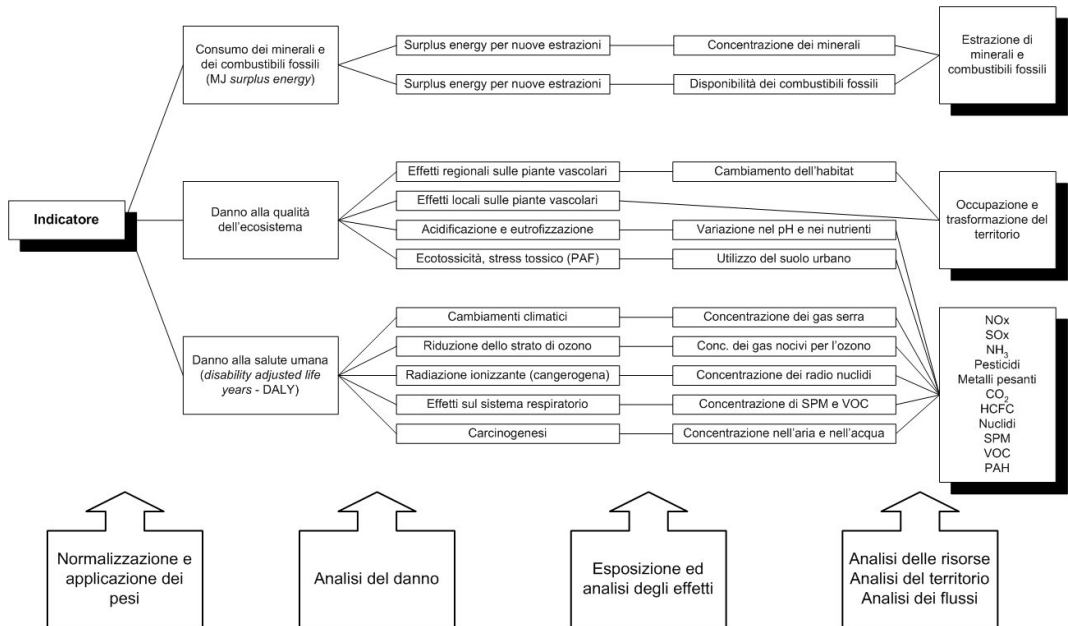


Figura 28. Struttura del metodo Eco-Indicator '99 [Go99]

Per poter aggregare tra loro i diversi tipi di danno è necessario definire uno strumento che permetta di pesare le diverse categorie. A tale scopo è stata scelta la scala DALY (*Disability Adjusted Life Year*) [Mu96], che è costituita dalla scala dei fattori di peso dell'invalidità ed indica le diverse tipologie di invalidità in un intervallo compreso tra 0 (nessun danno alla salute è rilevabile) e 1 (morte dell'individuo). L'unità di misura adottata per la categoria "salute umana" (HH) risulta appunto il DALY; un flusso di sostanze tossiche, espresso in t/anno, può venir convertito attraverso opportune valutazioni e funzioni peso caratteristiche di ciascun elemento in un numero di DALY/anno;

- categoria di danno: qualità dell'ecosistema (*Ecosystem Quality*).

Tale valutazione risulta difficile anche a causa della complessità dell'ecosistema. Quale indicatore di questa categoria di danno viene utilizzata la biodiversità e si esprime il danno all'ecosistema come percentuale di specie che potenzialmente scompaiono (*Potentially Disappeared Fraction, FDP*) in una determinata area e in un determinato periodo. Le fonti di danno si possono dividere in:

- ecotossicità: per valutarla è utilizzato un metodo che consente di determinare la "frazione potenziale affetta" (*Potentially Affected Fraction, PAF*) di specie in relazione alla concentrazione di sostanze tossiche; essa è determinata sulla base dei dati di tossicità per gli organismi acquatici e terrestri (micro-organismi, piante, vermi, alghe, anfibi, molluschi, crostacei e pesci). La PAF esprime il valore percentuale di specie che risultano esposte ad una concentrazione di agenti tossici superiore alla NOEC (*No Observed Effect Concentration*), valore di concentrazione per il quale non si riscontrano danni all'ecosistema. Poiché questa tipologia di danno

non è sempre direttamente osservabile, è utilizzato un fattore di conservazione per valutare il danno reale:

$$PDF = 10 \cdot PAF$$

- acidificazione ed eutrofizzazione: per queste due tipologie di danno ambientale non è possibile utilizzare direttamente la PAF dal momento che un danno è imputabile a meccanismi biochimici complessi e molto diversi tra loro. La valutazione è stata basata sull'osservazione degli effetti di acidificazione ed eutrofizzazione sulle piante. A partire dalle osservazioni svolte è stata determinata la probabilità di trovare ancora una determinata specie vegetale nell'area scelta per l'analisi dopo un fissato intervallo di tempo (probabilità di occorrenza – *Probability Of Occurrence*, POO). Viene quindi definita la “potenziale frazione scomparsa” (*Potentially Disappeared Fraction*, PDF) che risulta:

$$PDF = 1 - POO$$

Il modello assunto permette di calcolare il numero di specie, tra quelle scelte come riferimento, che si sviluppano in maniera eccessiva o che, invece, scompaiono a causa di una deposizione addizionale degli elementi inquinanti;

- utilizzo del territorio: viene utilizzata, come indicatore, la PDF; vengono considerate tutte le specie meno quelle di riferimento. I dati sono basati su osservazioni, non su modelli;
- categoria di danno: risorse (*Resources*).

L'ecoindicatore '99 considera esclusivamente i minerali e i combustibili fossili. L'uso di risorse biologiche e di materiali, quali sabbia e ghiaia, vengono computati considerando l'occupazione del territorio e lo sfruttamento del terreno nella categoria “qualità dell'ecosistema” (*Ecosystem Quality*). Nel considerare le risorse non rinnovabili è necessario conoscere non solo il valore della produzione ottimale, ma anche le dimensioni dei depositi esistenti e la loro sfruttabilità. L'estrazione e lo sfruttamento di tali risorse comporta un aumento dell'energia necessaria per le estrazioni future ed una diminuzione della disponibilità di risorse non rinnovabili per le prossime generazioni. L'unità di misura utilizzata per la quantificazione dell'impatto relativo alla categoria di danno risorse (*resources*) è l'energia di surplus (*surplus energy*), espressa in MJ/kg materiale estratto, che rappresenta l'aumento atteso di energia richiesta per l'estrazione di 1 kg di materiale a partire dalla situazione nella quale sia stato estratto cumulativamente un quantitativo di risorse pari a 5 volte la quantità effettivamente estratta dall'inizio dello sfruttamento a livello industriale fino al 1990.

Per quanto riguarda la normalizzazione, il fattore relativo si riferisce all'effetto equivalente causato da una persona media in un giorno. I fattori di normalizzazione sono stati calcolati per le seguenti situazioni di riferimento:

- prospettiva individualista (*Individual version*), che considera solo le relazioni causa-effetto comprovate;
- prospettiva gerarchica (*Hierarchical version*), che valuta anche i fattori d'impatto

di cui si fanno portavoce i gruppi scientifici o politici, pur senza comprovati fondamenti scientifici;

- prospettiva egualitaria (*Egalitarian version*), che applica un principio di salvaguardia cautelativa e quindi considera anche i fattori d'impatto presenti.

Nella normalizzazione, i valori ottenuti devono essere moltiplicati per opportuni coefficienti di peso che rappresentano la percezione, da parte di una popolazione campione, dell'entità del danno provocato dalle diverse categorie. La fase di valutazione distingue le stesse tre prospettive citate per la normalizzazione. Nella fase di normalizzazione e in quella di valutazione si è utilizzato l'indice EI99,HA (*Hierarchical approach*) specifico per fase. I risultati sono divisi in base agli impatti ambientali associati ai flussi in input ed output. In input si hanno solo gli impatti dovuti all'esaurimento delle risorse naturali, mentre in output si hanno gli impatti associati alle emissioni e ai rifiuti prodotti dai processi in esame. Nella figura 29 sono riportati i dati caratterizzati dei quattro sistemi a confronto, mentre in figura 30 sono riportati i dati caratterizzati e normalizzati e nelle figure 31, 32 e 33 sono riportati i risultati finali (dati caratterizzati, normalizzati e valutati).

Come si nota, il sistema di combustione a scarto legnoso trattato ha un impatto ambientale totale minore dei sistemi a combustibile fossile; in particolare, si nota che tale sistema ha un impatto maggiore del sistema a combustibile gassoso se si considerano solo i dati di output. A livello crescente di impatto totale (input più output) seguono il sistema di combustione a gasolio, quello a metano e quello a BTZ.

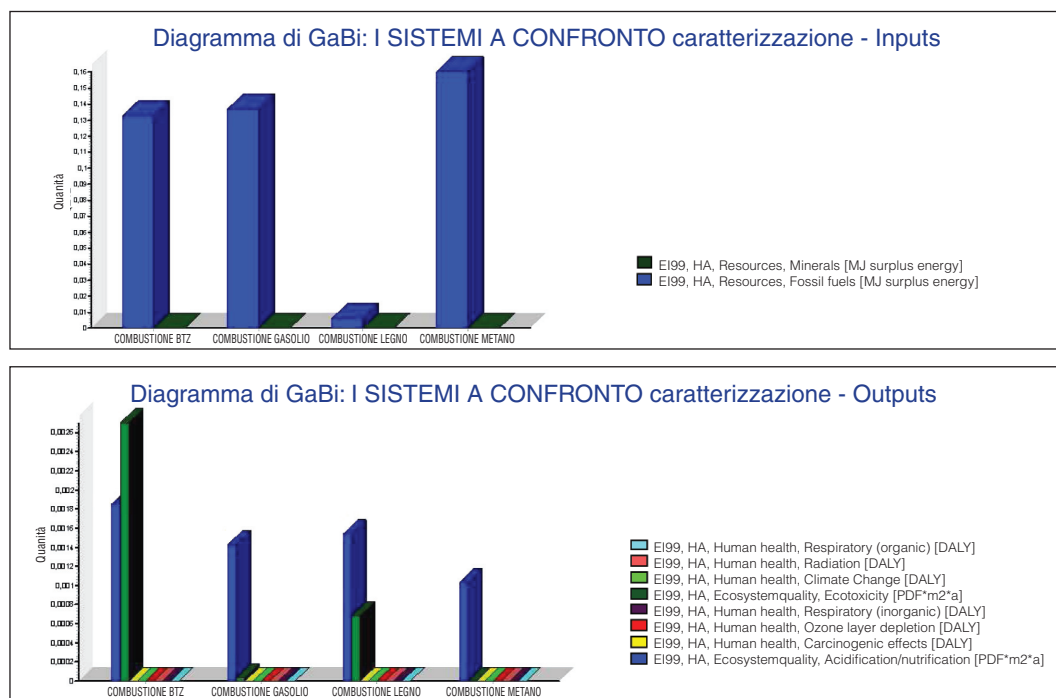


Figura 29. Risultati della caratterizzazione (Eco-Indicator '99)

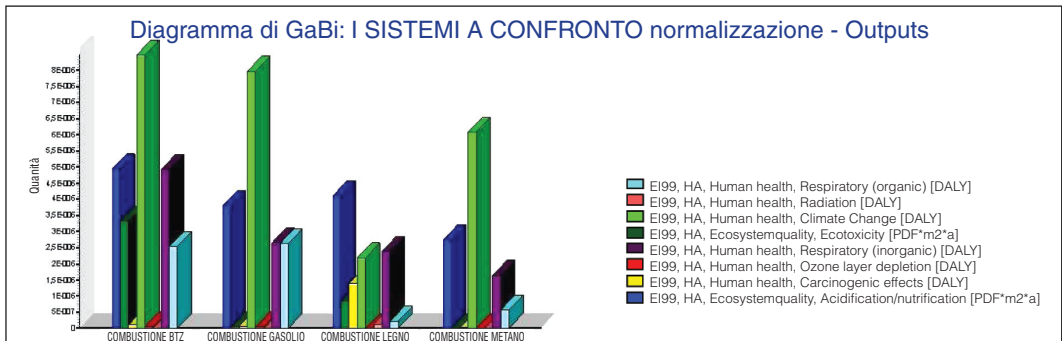
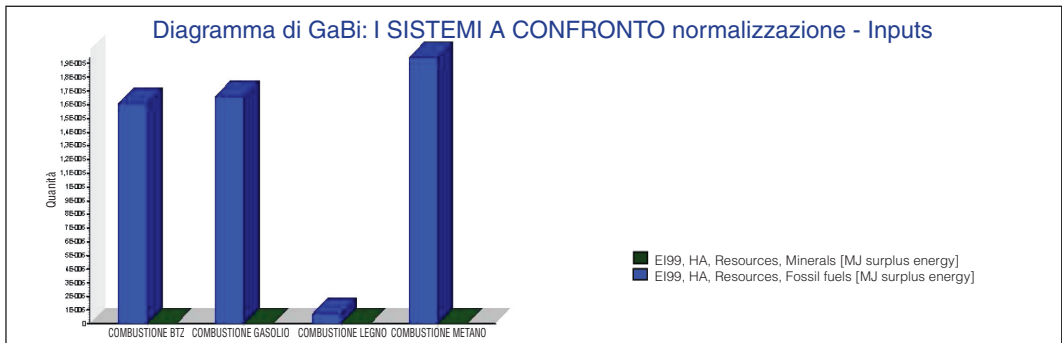


Figura 30. Risultati della normalizzazione (Eco-Indicator '99)

Risultati della Valutazione (EI99)

Visualizzazione bilancio: Eco-Indicator '99 VALUTAZIONE

| Flussi in ingresso | COMBUSTIONE BTZ | COMBUSTIONE GASOLIO | COMBUSTIONE LEGNO | COMBUSTIONE METANO |
|----------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| EI99, HA (Hierarchist approach) | 0,0031581 | 0,0032575 | 0,0001438 | 0,0038185 |
| EI99, HA, Resources, Fossil fuels | 0,0031581 | 0,0032575 | 0,0001438 | 0,0038185 |
| EI99, HA, Resources, Minerals | 2,86E-09 | 2,86E-09 | 4,87E-09 | 2,84E-09 |
| Flussi in uscita | COMBUSTIONE BTZ | COMBUSTIONE GASOLIO | COMBUSTIONE LEGNO | COMBUSTIONE METANO |
| EI99, HA (Hierarchist approach) | 0,0022634 | 0,0013558 | 0,001089 | 0,0009164 |
| EI99, HA, Ecosystem quality, Acidification/nutrification | 0,0001445 | 0,0001116 | 0,000123 | 8,07E-05 |
| EI99, HA, Ecosystem quality, Ecotoxicity | 0,0002105 | 2,62E-06 | 5,33E-05 | 9,07E-08 |
| EI99, HA, Human health, Carcinogenic effects | 6,10E-06 | 2,92E-06 | 7,27E-05 | 5,97E-07 |
| EI99, HA, Human health, Climate Change | 0,0005262 | 0,0004948 | 0,000136 | 0,0003778 |
| EI99, HA, Human health, Ozone layer depletion | 2,97E-07 | 3,06E-07 | 2,54E-08 | 1,61E-08 |
| EI99, HA, Human health, Radiation | 6,06E-09 | 6,09E-09 | 8,88E-08 | 5,42E-09 |
| EI99, HA, Human health, Respiratory (inorganic) | 0,0013713 | 0,0007389 | 0,000704 | 0,0004561 |
| EI99, HA, Human health, Respiratory (organic) | 4,53E-06 | 4,67E-06 | 3,86E-07 | 1,03E-06 |
| EI99, HA, Ecosystem quality, Land conversion | 0 | 0 | 0 | 0 |
| EI99, HA, Ecosystem quality, Land-use | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTALE | COMBUSTIONE BTZ | COMBUSTIONE GASOLIO | COMBUSTIONE LEGNO | COMBUSTIONE METANO |
| | 0,005421530 | 0,004613274 | 0,001233308 | 0,004734900 |

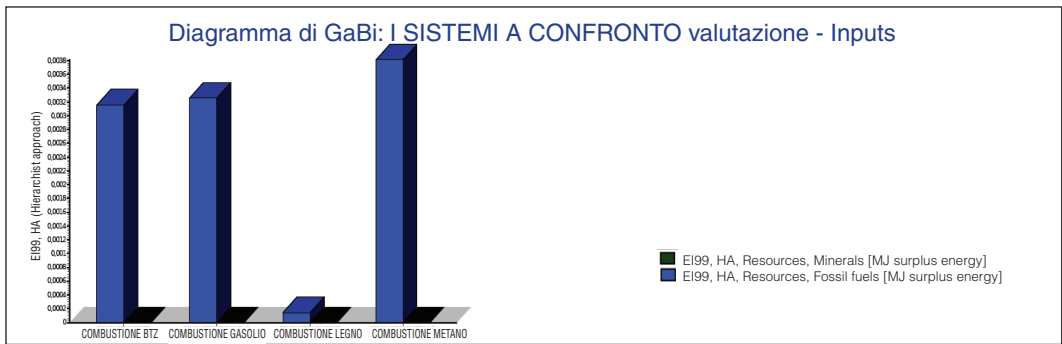


Figura 31. Risultati della valutazione – input (Eco-Indicator '99)

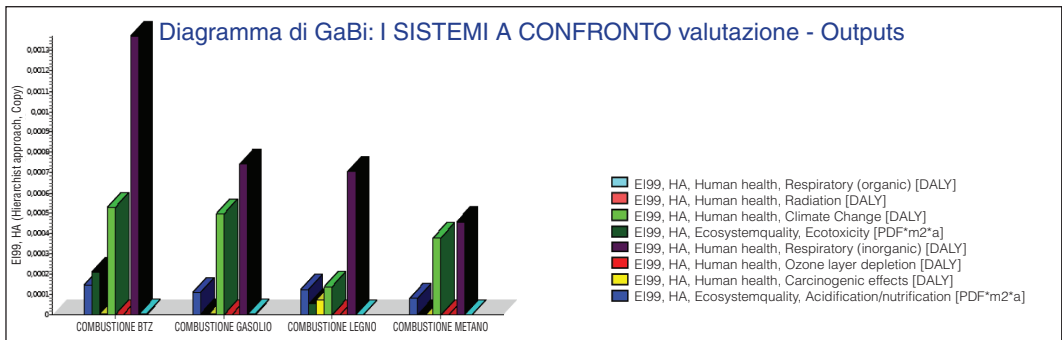


Figura 32. Risultati della valutazione – output (Eco-Indicator '99)

ECO-INDICATOR '99, HA

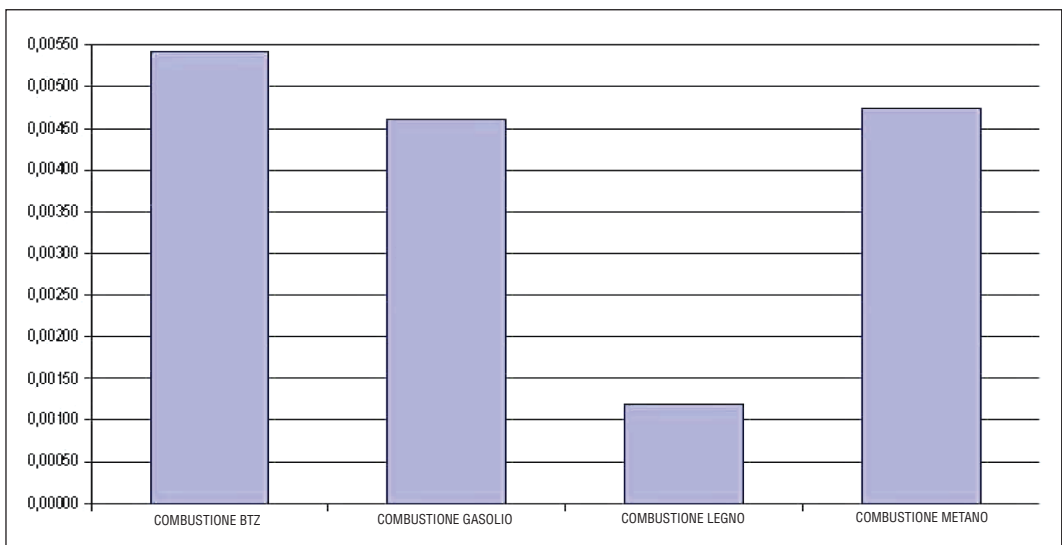


Figura 33. Risultati della valutazione (Eco-Indicator '99)

Nelle figure 34, 35, 36 e 37 sono riportati i risultati finali in percentuale relativi alle categorie di impatto per ogni sistema analizzato. A livello di ogni singolo sistema, gli impatti di maggiore rilevanza si hanno nella categoria di “danno alla salute umana – effetti sull’apparato respiratorio” e nella categoria “danno alla salute umana – cambiamenti climatici”. Nelle figure 38, 39, 40 e 41 sono riportati i risultati finali degli impatti per ogni singolo processo di ogni singolo sistema. La maggior parte degli impatti è dovuta al processo di combustione e in minima parte ai processi di trasporto in generale e di smaltimento dei materiali che vanno in discarica controllata.

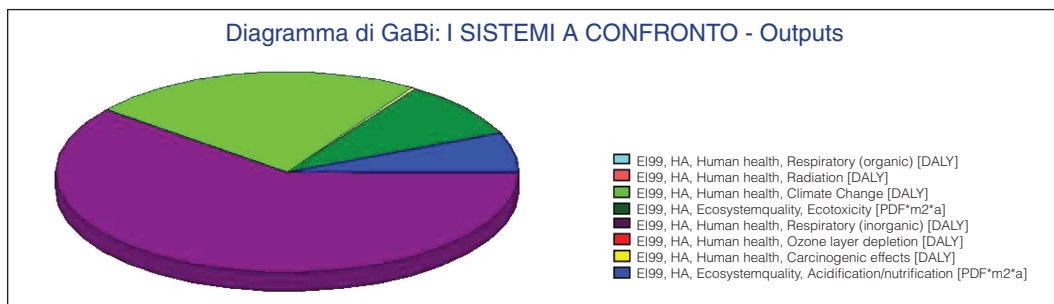


Figura 34. Combustione a BTZ (Eco-Indicator '99)

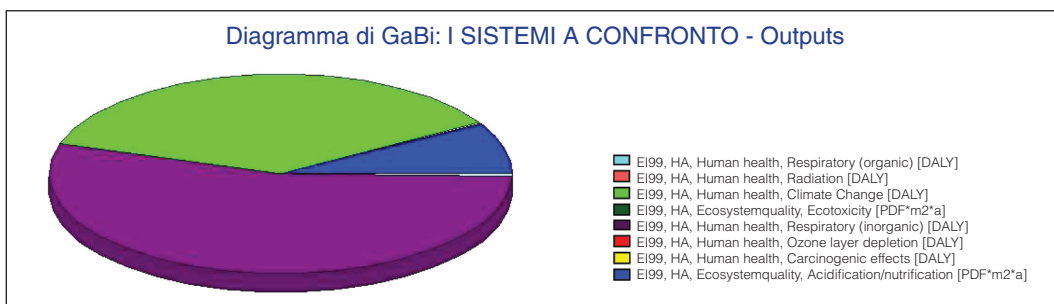


Figura 35. Combustione a gasolio (Eco-Indicator '99)

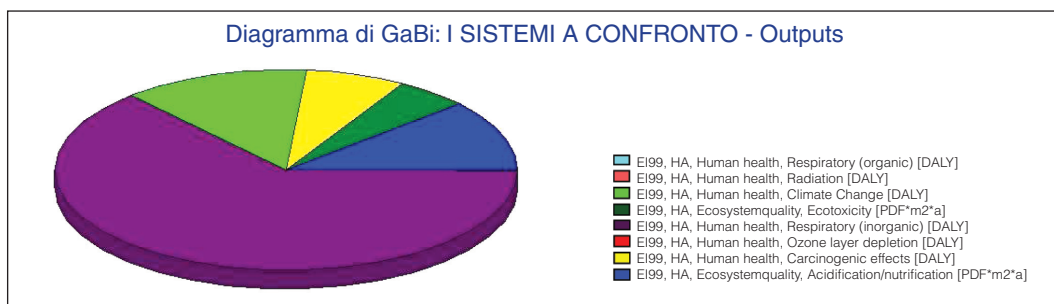
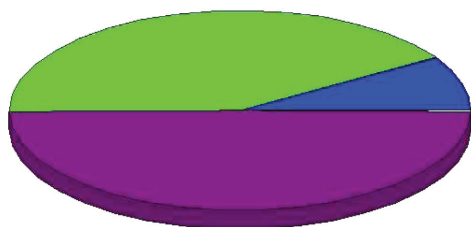


Figura 36. Combustione a scarto legnoso (Eco-Indicator '99)

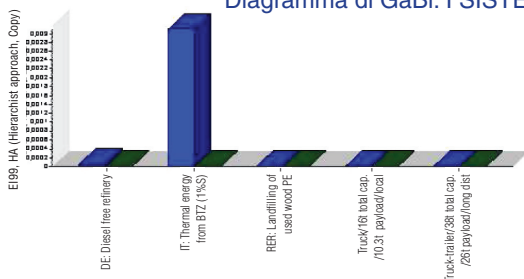
Diagramma di GaBi: I SISTEMI A CONFRONTO valutazione - Outputs



- E199, HA, Human health, Respiratory (organic) [DALY]
- E199, HA, Human health, Radiation [DALY]
- E199, HA, Human health, Climate Change [DALY]
- E199, HA, Ecosystemquality, Ecotoxicity [PDF*m2*a]
- E199, HA, Human health, Respiratory (inorganic) [DALY]
- E199, HA, Human health, Ozone layer depletion [DALY]
- E199, HA, Human health, Carcinogenic effects [DALY]
- E199, HA, Ecosystemquality, Acidification/nutrication [PDF*m2*a]

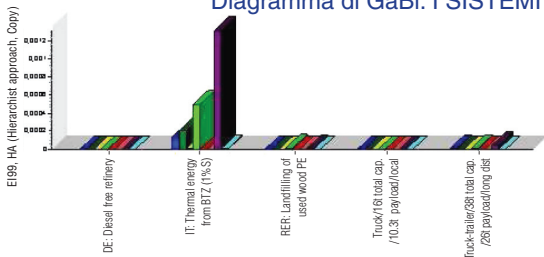
Figura 37. Combustione a metano (Eco-Indicator '99)

Diagramma di GaBi: I SISTEMI A CONFRONTO - Inputs



- E199, HA, Resources, Minerals [MJ surplus energy]
- E199, HA, Resources, Fossil fuels [MJ surplus energy]

Diagramma di GaBi: I SISTEMI A CONFRONTO - Outputs



- E199, HA, Human health, Respiratory (organic) [DALY]
- E199, HA, Human health, Radiation [DALY]
- E199, HA, Human health, Climate Change [DALY]
- E199, HA, Ecosystemquality, Ecotoxicity [PDF*m2*a]
- E199, HA, Human health, Respiratory (inorganic) [DALY]
- E199, HA, Human health, Ozone layer depletion [DALY]
- E199, HA, Human health, Carcinogenic effects [DALY]
- E199, HA, Ecosystemquality, Acidification/nutrication [PDF*m2*a]

Figura 38. Sistema di combustione a BTZ – risultati finali (Eco-Indicator '99)

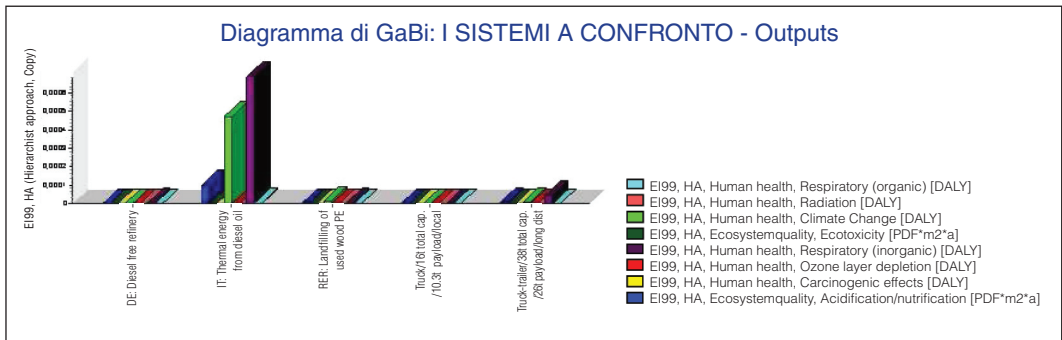
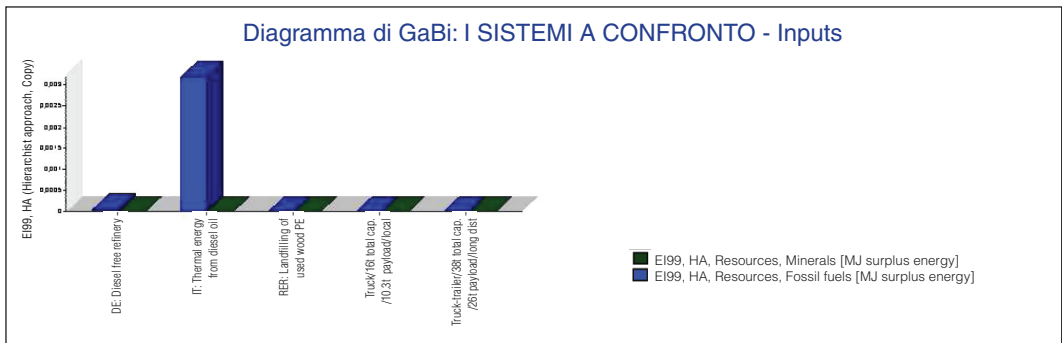


Figura 39. Sistema di combustione a gasolio – risultati finali (Eco-Indicator '99)

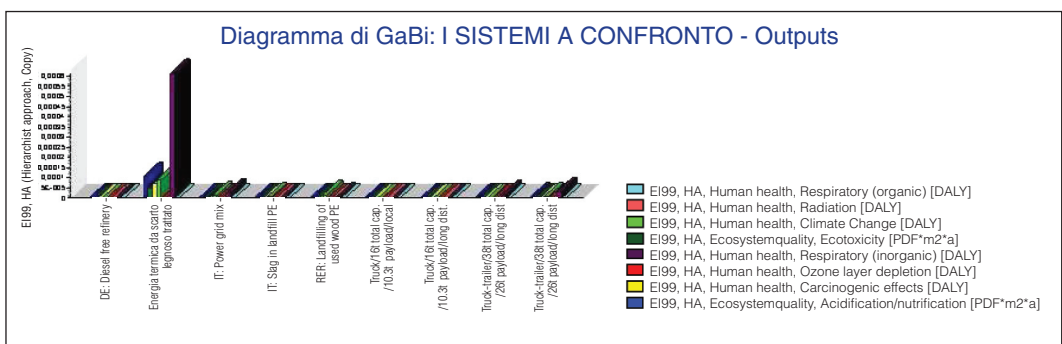
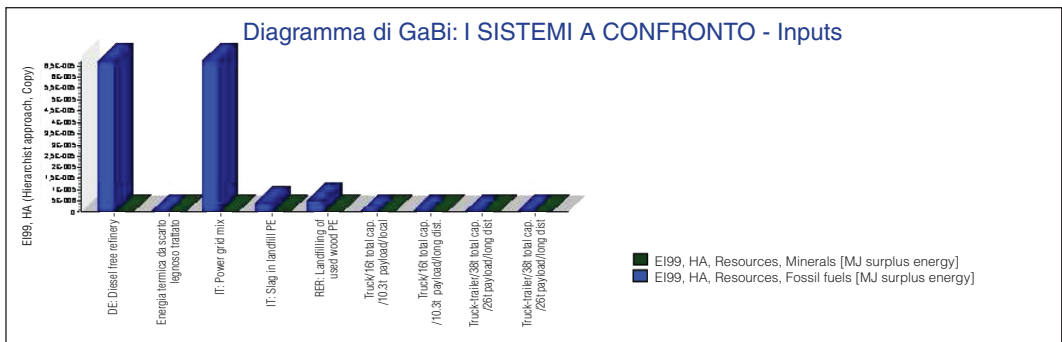


Figura 40. Sistema di combustione a scarto legnoso trattato – risultati finali (Eco-Indicator '99)

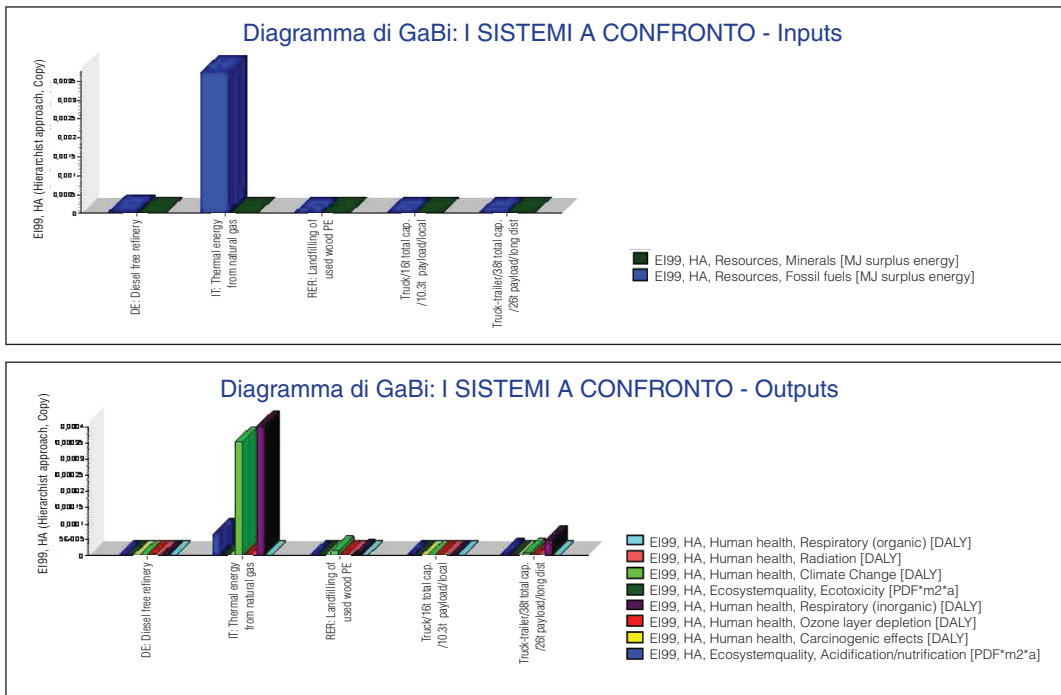


Figura 41. Sistema di combustione a metano – risultati finali (Eco-Indicator '99)

3.4. Interpretation

La fase di *interpretation* consente di interpretare i risultati relativi agli impatti dei quattro sistemi studiati. Questa fase dell’LCA si concretizza nell’esposizione delle valutazioni raggiunte e nell’interpretazione dell’affidabilità dei risultati raggiunti avvalendosi anche dell’aiuto delle analisi di scenario. I risultati che si forniscono dipendono da diversi fattori e, in particolare, dalla qualità dei dati raccolti nella fase di inventario, ma anche dalla metodologia di analisi adottata.

Per quanto riguarda il metodo CML 2001, osservando i risultati riportati nelle figure 15 e 16 si nota come l’ecotossicità marina assuma valori molto elevati nel caso di combustione degli scarti legnosi trattati. La causa di questo fenomeno è dovuta all’inserimento del valore previsto dalla normativa per l’acido fluoridrico (HF) durante il processo di combustione come limite di emissione. Si ricorda che tali limiti di emissione sono stati desunti dal D.M. 05.02.1998 che regola i limiti massimi consentiti in caso di combustione dello scarto

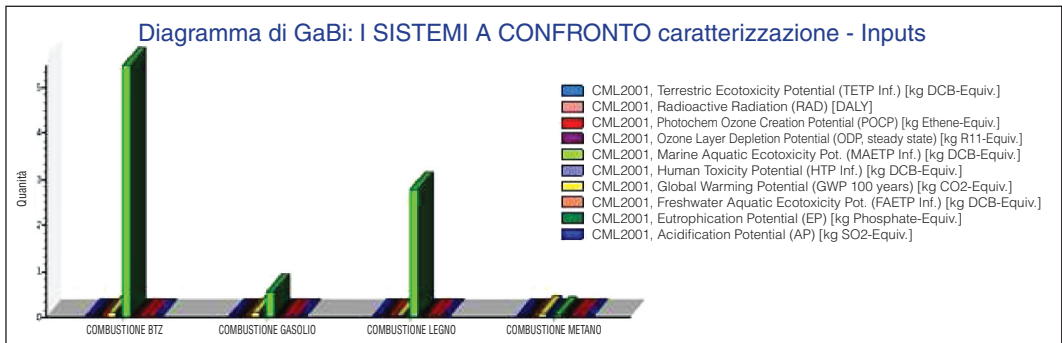


Figura 42. Risultati della caratterizzazione (CML 2001)

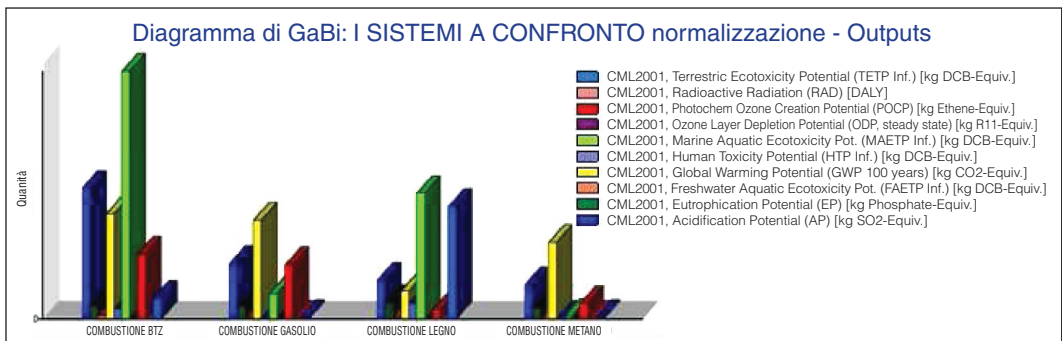


Figura 43. Risultati della normalizzazione (CML 2001)

legnoso trattato.

Nella realtà le emissioni di tale composto risultano essere molto al di sotto del limite di legge di 2 mg/Nm^3 , (valore medio su trenta minuti) addirittura quasi sempre sotto il limite di rilevanza delle apparecchiature impiegate. Ciò sta ad indicare che il limite, preso a riferimento dalla norma europea per l'incenerimento dei rifiuti, non è congruente con la tipologia di rifiuto utilizzato e potrebbe essere abbassato con apposito provvedimento normativo. Nelle figure 42 e 43 sono stati riportati i valori di impatto prendendo a riferimento un limite, più simile alla realtà, di $0,05 \text{ mg/Nm}^3$.

Il metodo CML 2001 non tiene conto nella fase di valutazione della categoria di impatto relativa all'ecotossicità, perciò tale problematica non ha implicazioni a livello di risultati finali. Anche la categoria di impatto relativa alla tossicità umana è esclusa dalla fase di valutazione (figura 43).

I risultati finali, cioè quelli caratterizzanti, normalizzati e valorizzati dei quattro sistemi analizzati, mostrano come il sistema di combustione a scarto legnoso trattato abbia impatto ambientale minore degli altri sistemi a combustibile fossile. A livello crescente di impatto seguono il sistema di combustione a metano, quello a gasolio e quello a BTZ. La maggior parte degli impatti sono dovuti al processo di combustione e in minima parte ai generici processi di trasporto e di smaltimento in discarica controllata.

A livello di ogni singolo sistema, gli impatti di maggior rilevanza si hanno nella categoria “potenziale di riscaldamento globale” e sono dovuti in gran parte alle emissioni di CO₂ e di metano. Si ricorda che i risultati sono stati ottenuti e quindi sono validi con i vincoli e i confini dei sistemi fissati che non considerano la CO₂ prodotta dalla combustione della frazione legnosa degli scarti di legno trattati in quanto essa è prodotta dalla combustione di una risorsa rinnovabile e dunque il suo ciclo di produzione e assorbimento si trova in condizioni di equilibrio.

Nel caso del metodo Eco-Indicator '99, i risultati finali, cioè i dati caratterizzati, normalizzati e valorizzati dei quattro sistemi analizzati, mostrano come il sistema di combustione a scarto legnoso trattato abbia un impatto ambientale totale minore degli altri sistemi a combustibile fossile. In particolare, si nota che tale sistema ha un impatto maggiore del sistema a combustibile gassoso se si considerano solo i dati di output. A livello crescente di impatto seguono il sistema di combustione a gasolio, quello a metano e quello a BTZ.

A livello di ogni singolo sistema, gli impatti di maggior rilevanza si hanno nella categoria di “danno alla salute umana – effetti sul sistema respiratorio” e nella categoria di “danno alla salute umana – cambiamenti climatici”. Il primo tipo di impatto è dovuto principalmente alle emissioni di ossidi di azoto, di biossidi di zolfo e di polveri, mentre il secondo è dovuto principalmente alle emissioni di anidride carbonica e di metano. La maggior parte degli impatti sono dovuti al processo di combustione e in minima parte ai generici processi di trasporto e di smaltimento in discarica controllata.

Si ricorda che, anche in questo caso, i risultati sono stati ottenuti e quindi sono validi con i vincoli e i confini dei sistemi fissati che non considerano la CO₂ prodotta dalla combustione della frazione legnosa degli scarti di legno trattati in quanto essa è prodotta dalla combustione di una risorsa rinnovabile e dunque il suo ciclo di produzione e assorbimento si trova in condizioni di equilibrio. Una peculiarità della metodologia Eco-Indicator '99 degna di essere qui evidenziata è che il consumo di combustibili fossili ha un peso rilevante nella valutazione degli impatti globali. Tale circostanza mette in secondo piano le emissioni dovute ai processi di combustione e trasporto.

Per analizzare l'incidenza di alcuni parametri sui risultati, si sono eseguite tre diverse analisi di scenario facendo variare, in ciascuna di esse, i valori di un parametro scelto e lasciando invariate le altre condizioni di funzionamento del sistema.

Si ricorda che i risultati fin qui ottenuti per il sistema di combustione a scarto legnoso sono stati calcolati prendendo a riferimento (vedi paragrafo 1) il dato che il 63% dello scarto auto-prodotto sia sottoposto a combustione, che il restante 35% vada all'industria del pannello ed il 2% in discarica.

Con la prima analisi di scenario si vuole dimostrare che anche al variare di tale percentuale, l'utilizzo energetico dello scarto legnoso è globalmente meno impattante rispetto all'utilizzo dei combustibili fossili.

Partendo dal presupposto di tenere fissa la quantità di energia termica prodotta nei quattro sistemi e quindi di tenere fissa la quantità di scarto legnoso avviato a combustione

nel medesimo sistema, si sono confrontati gli impatti ambientali dovuti alla variazione della percentuale di scarto legnoso combusto sul totale dello scarto prodotto.

Posto che una ipotetica azienda abbia un fabbisogno termico di 1 MJ e che quindi il quantitativo di rifiuto necessario per produrlo sia pari a 0,066 Kg di scarto legnoso trattato, andando a variare la quantità totale di scarti legnosi prodotti da tale azienda varierà anche la percentuale sul totale dello scarto che sarà combusto.

Al variare della percentuale di scarto combusto, tenendo fissa la quantità di energia termica prodotta, si nota che l'andamento degli impatti ambientali generati dai quattro sistemi studiati varia in maniera uguale.

I risultati relativi agli impatti dei quattro sistemi utilizzando il metodo CML 2001 ed il metodo Eco-Indicator '99 sono rispettivamente riportati nelle figure 44 e 45.

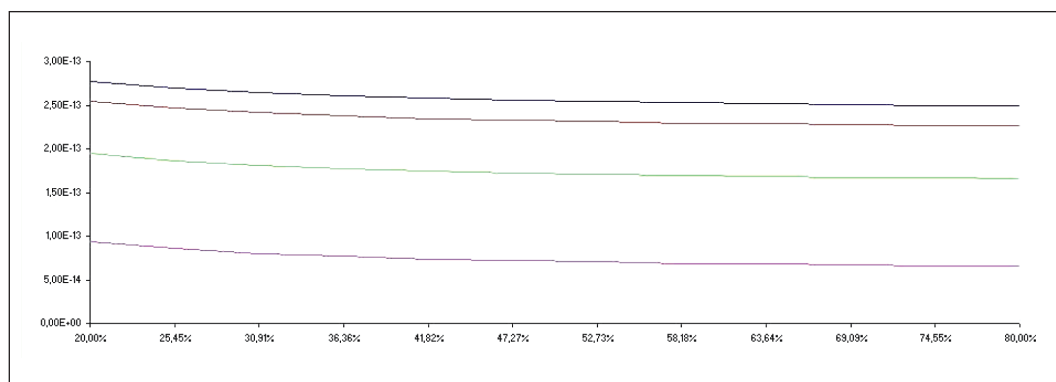


Figura 44. Variazione della percentuale di scarto combusto (CML 2001)

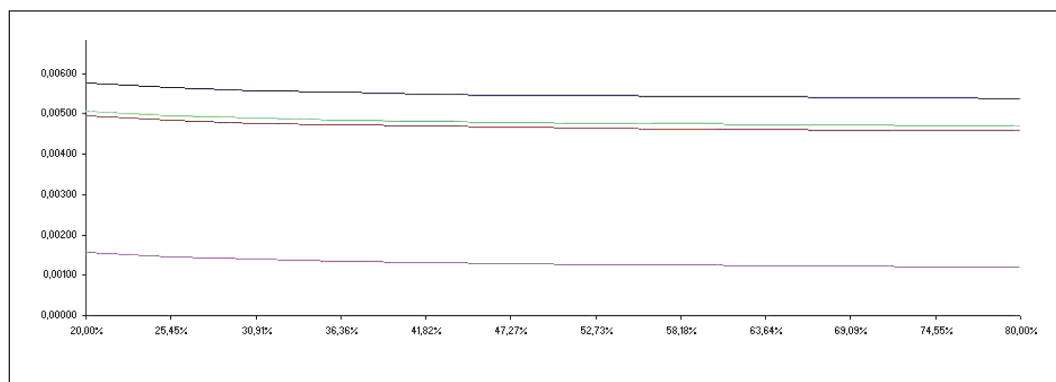


Figura 45. Variazione della percentuale di scarto combusto (Eco Indicator '99)

Dai grafici si nota come all'aumentare della percentuale rispetto alla quantità totale di scarto legnoso trattato sottoposto alla combustione per la produzione di 1 MJ di energia termica e quindi man mano che diminuiscono gli scarti legnosi trattati prodotti, si ha una diminuzione degli impatti ambientali in tutti i sistemi. Tale diminuzione è dovuta al fatto che diminuisce in maniera uguale in tutti i sistemi la quantità di scarto legnoso da sottoporre all'industria del pannello truciolare. Confrontando le quattro curve, si desume che i risultati non dipendono dalla quantità di scarto legnoso trattato prodotto e perciò neanche dalla percentuale di scarto che si dovrebbe bruciare per soddisfare il fabbisogno energetico perché indipendentemente da tale quantità e percentuale il sistema di combustione a scarto legnoso trattato risulta sempre il meno impattante a livello ambientale.

Per la seconda analisi di scenario, si sono variati da 200 a 500 mg/Nm³ i livelli di emissione degli ossidi di azoto ammessi (NOx) dal D.M. 05.02.1998 per il processo di combustione degli scarti legnosi trattati. I risultati relativi ai flussi dei quattro sistemi sono stati riportati nelle figure 46 e 47 utilizzando il metodo CML2001 e Eco-Indicator '99. Dalle stesse si nota che man mano che aumentano le emissioni degli ossidi di azoto, aumentano naturalmente anche gli impatti ambientali del sistema di combustione a scarto legnoso trattato. A livello di flussi totali (input + output), però, sebbene siano aumentati gli impatti ambientali, il sistema di combustione degli scarti legnosi trattati risulta più conveniente degli altri sistemi (figura 46).

Se si analizzano solo i flussi di uscita, utilizzando il metodo Eco-Indicator '99, si nota (figura 47) che per valori superiori a 260 mg/Nm³, i flussi in uscita dal sistema di combustione a scarti legnosi trattati impattano di più dei flussi in uscita dal sistema di combustione a metano. L'aumento delle emissioni degli ossidi di azoto comporta un aumento dei valori nelle categorie:

- CML2001, Acidification Potential (AP);
- CML2001, Eutrophication Potential (EP);
- CML2001, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP);
- CML2001, Human Toxicity Potential (HTP inf.);
- EI99, HA Ecosystem quality, Acidification/nitrification;
- EI99, HA, Human health, Respiratory (inorganic).

| Valutazione/Normalizzazione: CML2001, Experts IKP (Southern Europe)/CML2001, Europe | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| Sistema | Scenario 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Scenario 12 |
| NOx | 200,00 | 227,27 | 254,55 | 281,82 | 309,09 | 336,36 | 363,64 | 390,91 | 418,18 | 445,45 | 472,73 | 500,00 |
| Flussi ingresso + uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 5,84E-14 | 5,97E-14 | 6,10E-14 | 6,23E-14 | 6,36E-14 | 6,49E-14 | 6,62E-14 | 6,75E-14 | 6,88E-14 | 7,01E-14 | 7,14E-14 | 7,27E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 |
| Flussi uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 5,64E-14 | 5,77E-14 | 5,90E-14 | 6,03E-14 | 6,16E-14 | 6,29E-14 | 6,42E-14 | 6,55E-14 | 6,68E-14 | 6,81E-14 | 6,94E-14 | 7,07E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 |

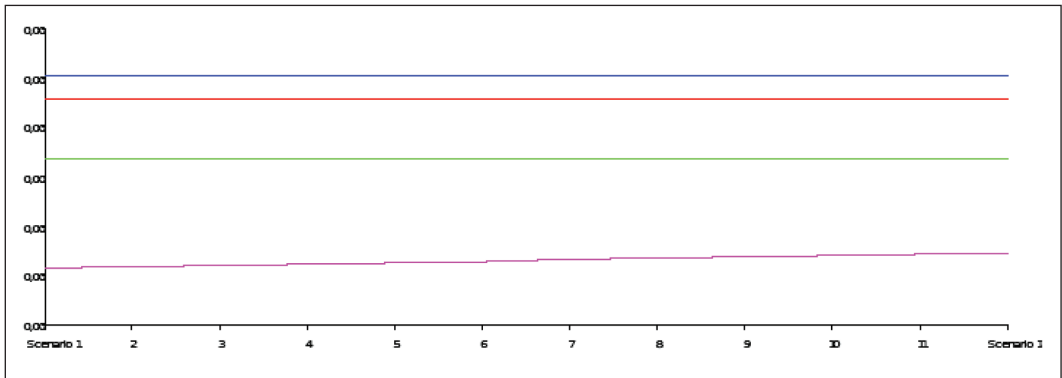
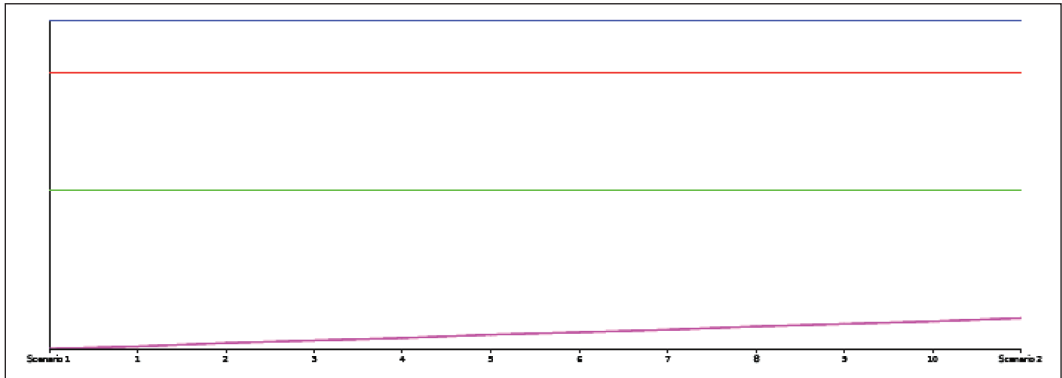


Figura 46. Variazione NOx: flussi in uscita e totali (CML2001)

| Valutazione/Normalizzazione: E199, HA (Hierarchist approach) | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
| Sistema | Scenario 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Scenario 12 |
| NOx | 200,00 | 227,27 | 254,55 | 281,82 | 309,09 | 336,36 | 363,64 | 390,91 | 418,18 | 445,45 | 472,73 | 500,00 |
| Flussi ingresso + uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 | 0,00542 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 | 0,00461 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 0,00090 | 0,00095 | 0,00099 | 0,00104 | 0,00108 | 0,00113 | 0,00117 | 0,00122 | 0,00126 | 0,00131 | 0,00135 | 0,00140 |
| COMBUSTIONE METANO | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 | 0,00473 |
| Flussi uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 | 0,00226 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 | 0,00136 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 0,00076 | 0,00080 | 0,00085 | 0,00089 | 0,00094 | 0,00098 | 0,00103 | 0,00107 | 0,00112 | 0,00116 | 0,00121 | 0,00125 |
| COMBUSTIONE METANO | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 | 0,00092 |

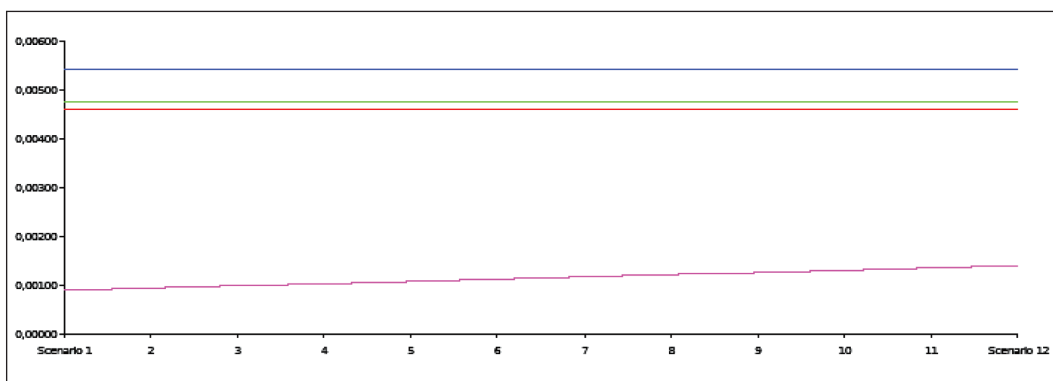
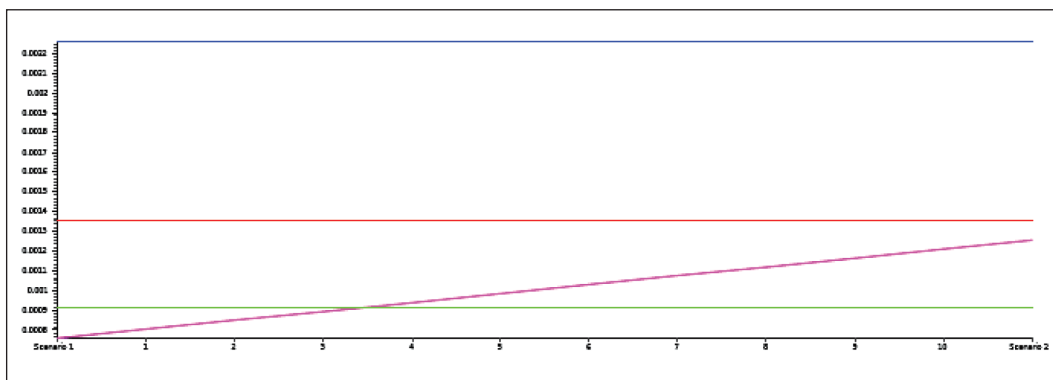


Figura 47. Variazione NOx: flussi in uscita e totali (Eco-Indicator '99)

Per la terza analisi di scenario, si sono variati da 100 a 500 mg/Nm³ i limiti di emissione del CO - monossido di carbonio - ammessi dal D.M. 05.02.1998 per il processo di combustione degli scarti legnosi trattati. I dati relativi ai flussi dei quattro sistemi sono riportati in figura 48 per il metodo CML2001. Il metodo Eco-Indicator '99 (*Hierarchist approach*) non considera la CO come sostanza pericolosa e quindi non la conteggia.

Come si nota dal grafico, all'aumentare delle emissioni di monossido di carbonio aumentano naturalmente anche gli impatti ambientali del sistema di combustione a scarto legnoso trattato. A livello di flussi, però, sebbene si siano aumentati gli impatti ambientali,

il sistema di combustione degli scarti legnosi trattati risulta sempre più conveniente degli altri sistemi. Confrontando il grafico di figura 48 con il grafico di figura 46 si nota che gli impatti ambientali causati da un aumento del CO sono minori di quelli causati da un aumento delle emissioni di NOx. L'aumento delle emissioni del monossido di carbonio comporta un aumento dei valori di monossido di carbonio comporta l'aumento dei valori nella categoria di CML2001, *Photochem. Ozone Creation Potential* (POCP).

| Valutazione/Normalizzazione: CML2001, Experts IKP (Southern Europe)/CML2001, Europe | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| Sistema | Scenario 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Scenario 12 |
| CO | 100,00 | 136,36 | 172,73 | 209,09 | 245,45 | 281,82 | 318,18 | 354,55 | 390,91 | 427,27 | 463,64 | 500,00 |
| Flussi ingresso + uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 | 2,52E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 | 2,29E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 6,79E-14 | 6,81E-14 | 6,83E-14 | 6,84E-14 | 6,86E-14 | 6,87E-14 | 6,89E-14 | 6,91E-14 | 6,92E-14 | 6,94E-14 | 6,95E-14 | 6,97E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 | 1,69E-13 |
| Flussi uscita | | | | | | | | | | | | |
| COMBUSTIONE BTZ | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 | 2,10E-13 |
| COMBUSTIONE GASOLIO | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 | 1,86E-13 |
| COMBUSTIONE LEGNO | 6,59E-14 | 6,61E-14 | 6,63E-14 | 6,64E-14 | 6,66E-14 | 6,67E-14 | 6,69E-14 | 6,70E-14 | 6,72E-14 | 6,74E-14 | 6,75E-14 | 6,77E-14 |
| COMBUSTIONE METANO | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 | 1,30E-13 |

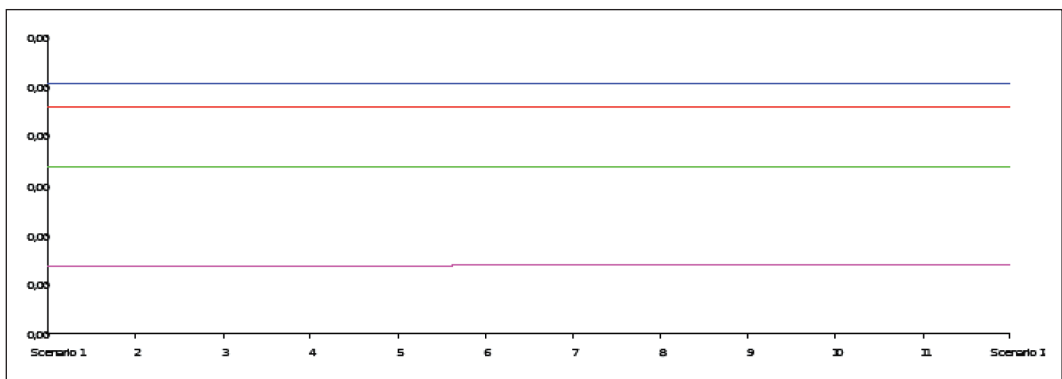
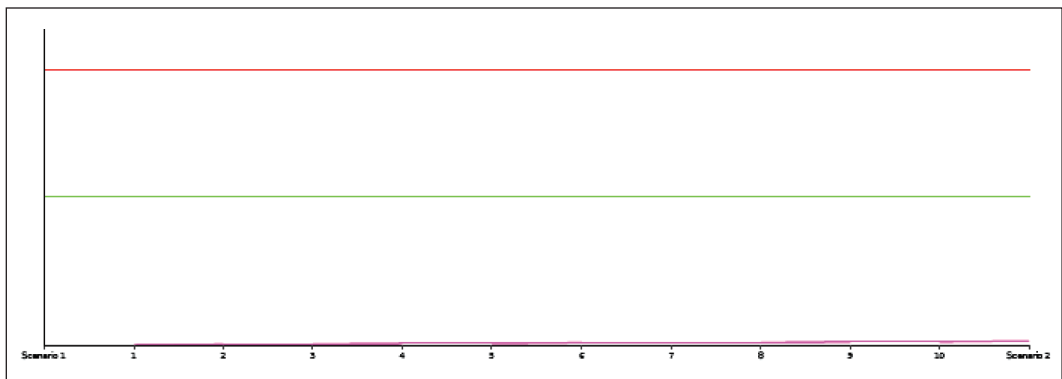


Figura 48. Variazione CO: flussi in uscita e totali (CML 2001)

4. Conclusioni

Lo studio che è stato sviluppato nella presente ricerca ha avuto lo scopo di confrontare i potenziali impatti ambientali globali dovuti alla produzione di energia termica necessaria ad unità produttive del settore del mobile-arredo italiano impiegando differenti combustibili: lo scarto legnoso trattato, inteso come materiale di recupero, e quelli di origine fossile quali BTZ, gasolio e metano. Si è effettuato il Life Cycle Assessment di questi quattro processi e, in particolare, si sono confrontati gli impatti ambientali globali ottenuti partendo dal presupposto di produrre la stessa quantità di energia termica – 1 MJ – bruciando rispettivamente scarti legnosi trattati, gasolio, olio combustibile fluido BTZ e metano, e dal presupposto di mantenere la stessa quantità di materiale legnoso in input nel processo di produzione del pannello truciolare integrando con altra fonte la quantità la quantità di scarto avviato a combustione e pesandone gli impatti. Per la realizzazione dello studio si sono presi a riferimento, esemplificativo dell'industria italiana del mobile, i dati relativi al Distretto del Mobile del Livorno.

I processi utilizzati per la valutazione dell'impatto con il software Gabi4 sono presenti nel database dello stesso, ad eccezione del processo "energia termica da scarto legnoso trattato" che è stato appositamente creato. La struttura dell'analisi è stata sviluppata nelle seguenti fasi:

- definizione degli obiettivi e degli ambiti (*Goal e Scope Definition*), che prevede la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi;
- analisi dell'inventario (*Inventory Analysis* o *Life Cycle Inventory – LCI*), che prevede la compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema. In questa fase si quantificano i flussi di materia e di energia in ingresso ed in uscita dalle varie fasi del ciclo di vita;
- valutazione dell'impatto (*Impact Assessment*), che prevede la valutazione del potenziale impatto ambientale correlato agli input ed output determinati nella fase precedente di inventario;
- interpretazione (*Interpretation*), che prevede l'interpretazione dei risultati e che

si concretizza nell'esposizione delle valutazioni raggiunte e nella valutazione dell'affidabilità dei risultati.

Nella fase di Impact Assessment sono stati utilizzati i metodi CML2001 ed Eco-Indicator '99.

Dai risultati ottenuti emerge che il sistema di combustione a scarto legnoso trattato ha minor impatto ambientale rispetto a quelli alimentati a combustibile fossile. Secondo il metodo CML2001 a livello crescente di impatto seguono il sistema di combustione a metano, quello a gasolio e quello a BTZ. Secondo il metodo Eco-Indicator '99 a livello crescente di impatto seguono il sistema di combustione a gasolio, quello a metano e quello a BTZ.

In questo secondo caso una peculiarità della metodologia Eco-Indicator '99 è, come più sopra accennato, quella di assegnare maggior peso al consumo di fonti non rinnovabili rappresentate dai combustibili fossili. Tale circostanza mette in secondo piano le emissioni dovute ai processi di combustione e trasporto. Una peculiarità del metodo CML2001 è che non tiene conto, nella fase di valutazione, delle categorie di impatto relative all'ecotossicità e alla tossicità umana. La caratteristica più generale per entrambe le metodologie è che le risposte per le categorie di impatto, individuate per la valutazione dei processi conformemente alla logica del LCA, tengono conto degli effetti rilevabili su scala globale.

Lo studio mostra altresì che per la combustione del legno trattato di cui al punto 6 allegato 2 suballegato 1 del D.M. 05.02.1998 potrebbero essere fissati maggiori limiti alle emissioni di ossidi di azoto NO_x ed ossido di carbonio CO senza apprezzabili aumenti di impatto globale rispetto ai combustibili fossili per i quali, a parità di taglia di impianto di combustione, ben più elevati o addirittura inesistenti sono i limiti per i medesimi inquinanti.

Bibliografia

- [AA98] AA.VV.: Settore legno-arredo: importanza della combustione degli scarti legnosi – Il caso Triveneto – Federlegno-Arredo Triveneto, giugno 1998
- [AA05] AA.VV.: Energia prodotta dagli scarti della lavorazione del legno – Giornata di studio su “Energia prodotta dagli scarti della lavorazione del legno: opportunità di cogenerazione nel Distretto del Mobile” – Editrice Universitaria Udinese S.r.l. – Udine, 2005
- [AA06] AA.VV.: Compendio di dati tecnici ed ambientali relativi agli impianti derivanti dagli insediamenti produttivi del settore legno per lo studio di fattibilità della registrazione EMAS del Distretto del Mobile – Distretto del Mobile del Livenza, marzo 2006
- [Ar01] Arpa Toscana, Progetto Closet: Analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) delle filiere produttive dei Distretti Toscani dei settori tessili, cartario e vivaistico – Roma, 2001
- [Bo97] Boman R., Turnbull J.H.: Integrated biomass energy system and emission of carbon dioxide – Biomass and Bioenergy – Vol. 13, n. 6, pp. 333-343, 1997
- [Ca02] Catas S.p.A., Arpa del Friuli-Venezia Giulia, Dipartimento di Scienze Economiche dell’Università di Udine: Impatto della direttiva solventi sulle aziende della filiera del legno nelle province di Pordenone e Udine – Editrice Universitaria Udinese S.r.l., giugno 2002
- [Ca06] Camporeale S., De Nigris D.: Corso di energie alternative: lezioni sull’utilizzo delle biomasse per la produzione di energia – Politecnico di Bari – novembre 2006
- [De01] De Monte M., Padoano E., Pozzetto D. : Metodologie e criteri per la valutazione del Life Cycle Assessment di un prodotto/processo – Editrice Gogliardica – Trieste, 2001
- [De04] Del Simone B.: Impianti a biomassa e centrali di teleriscaldamento di medie dimensioni (5-6 MWt) – II° Corso “Formazione Quadri – Progetto dimostrativo integrato per la diffusione dell’uso del Progetto dei Biocombustibili” – Regione Lombardia, CTI, Milano, 2004
- [Ec03] Ecobilancio Italia S.r.l.: Valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA) e sue applicazioni in azienda – Settembre 2003 – www.ecobilancioitalia.it

- [Ga07] Canapini W.: Bioenergia – Valori – Mensile di economia sociale, finanze, etica e sostenibilità – Anno 7, numero 48, aprile 2007
- [Go99] Goedkoop M., Spriensma R.: *The Eco-indicator '99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report*, Amersfoort, PRÉ Consultants, The Netherlands, 1999
- [He01] Hellrigl B.: Numeri per la dendroenergetica – Edizione provvisoria, 2001
- [Ku05] Kuo K.K.: Principles of combustion – John Wiley – Hoboken, New Jersey, 2005
- [Ig06] Elaborazione Igeam su dati ARPA FVG, 2006
- [Mi00] Milanese D.: Combustibili e combustione: generalità – Politecnico di Torino – Torino, ottobre 2000
- [Mo97] Monte A.: Elementi di impianti industriali – Libreria Corina – Torino, 1997
- [Mo05] Moukouba M.: Analisi del ciclo di vita delle cucine componibili: revisione critica di uno studio con il software Gabi – Master in “Tecnologie e Certificazioni ambientali – Università di Bologna – a.a. 2004-2005
- [Mu96] Murray C., Lopez A.: The global burden of disease – WHO, World Bank and Harvard School of public Health, Boston, USA, 1996
- [Na05] Nardin G., Simeoni P., Flaiban M.: L’approccio sistematico all’analisi degli impianti – Università di Udine – Udine, 2005
- [Ni04] Nicola A., Pesenti R.: Modelli e metodi di ricerca operativa applicata alla gestione industriale: Localizzazione – Università di Trieste – Trieste, 2004
- [Se93] Society of Environmental Toxicology and Chemistry: A conceptual Framework for Life Cycle Impact Assessment – Pensicola, USA, 1993
- [Sc03] Scipioni A, Arena F., Rigato A., Drago G.: Analisi comparativa del ciclo di vita tra contenitori per latte fresco e latte UHT: tetra Rex – PET e Tera Brik Aseptic – HDPE – Centro Studi Qualità Ambiente – Rubiera, 2003
- [Wi05] Wihersaari M.: Greenhouse gas emission from final harvest fuel chip production in Filand – Biomass and Bioenergy, Vol. 28, pp. 435-443, 2005

Finito di stampare
nel mese di dicembre 2007
Tipografia Ellerani s.r.l.
San Vito al Tagliamento PN