

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**  
**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA**  
**ENERGETICA**

**Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica**

**ANALISI LCA (LIFE CYCLE ASSESSMENT) DELLA**  
**PRODUZIONE DI ENERGIA DA GASSIFICAZIONE DI**  
**BIOMASSA**

*Relatore: Ing. Anna Stoppato*

*Laureando: Lorenzo Bigaran*

ANNO ACCADEMICO

2012 – 2013



# INDICE

INTRODUZIONE.....	1
1. CONTESTO ENERGETICO.....	3
1.1 Il PAN italiano.....	9
1.1.1 Strategia.....	9
1.1.2 Consumi finali di energia e obiettivi per le energie rinnovabili .....	11
1.1.3 Misure di sostegno per il conseguimento degli obiettivi .....	12
1.2 Fonti energetiche .....	16
1.3 Fonti di energia rinnovabili.....	17
1.4 Risorsa solare: il fotovoltaico .....	19
1.5 Risorsa solare: il solare termico.....	20
1.6 Risorsa eolica.....	21
1.7 Risorsa idroelettrica.....	22
1.8 Risorsa biomassa .....	23
2. LA BIOMASSA.....	29
2.1 Introduzione.....	29
2.1.1 Perché scegliere impianti a biomassa .....	31
2.1.2 Integrazione con il territorio.....	33
2.1.3 L’impatto ambientale .....	34
2.2 Biomassa come combustibile.....	35
2.2.1 Biomasse di derivazione vegetale.....	36
2.2.2 Biomassa residuale e di derivazione forestale .....	39
2.2.3 Biomassa di derivazione agricola.....	39
2.2.4 Biomassa da colture energetiche .....	40
2.3 Caratteristiche delle biomasse ligno-cellulosiche.....	41
2.4 Lavorazioni preliminari e preparazione del .....	47
combustibile .....	47
2.5 La qualità del cippato.....	47
2.5.1 Il contenuto di fibra .....	48

2.5.2 Materia prima .....	48
2.5.3 Pezzatura del cippato .....	49
2.5.4 Contenuto di umidità .....	51
2.5.5 Classificazione e standardizzazione .....	51
2.5.6 Conservazione del cippato .....	52
2.5.7 Modalità di stoccaggio .....	53
<b>3. I GASSIFICATORI.....</b>	<b>55</b>
3.1 Il processo di gassificazione .....	55
3.1.1 Pirolisi .....	56
3.1.2 Gassificazione .....	60
3.2 Gassificazione del char .....	63
3.3 Reazione di shift .....	64
3.4 Il rapporto di equivalenza .....	66
3.5 Rendimento del processo di gassificazione .....	69
3.5.1 Influenza della pressione di lavoro .....	71
3.6 Impiego e caratteristiche del syngas .....	73
3.7 Tipologie di gassificatori .....	74
3.8 Gassificatori a letto fisso .....	76
3.8.1 Gassificatori a letto fisso Downdraft .....	77
3.8.2 Gassificatori a letto fisso Updraft .....	80
3.8.3 Gassificatori a letto fisso Crossdraft .....	82
3.9 Gassificatori a letto fluido .....	83
3.9.1 Gassificatori a letto fluido bollente (BFB) .....	85
3.9.2 Gassificatori a letto fluido circolante (CFB) .....	87
3.9.3 Gassificatori a letto fluido trascinato .....	89
3.10 Tabella riassuntiva dei vari gassificatori.....	90
<b>4. LCA: “life cycle assessment” .....</b>	<b>93</b>
4.1 Lo sviluppo sostenibile .....	93
4.1.1 Il concetto di impatto ambientale .....	94
4.2 L’analisi del ciclo di vita .....	95

4.2.1 Cenni storici .....	99
4.3 La struttura di una LCA .....	100
4.3.1 Prima fase di una LCA: definizione degli scopi e degli obiettivi .....	104
4.3.1.1 Definizione del sistema .....	105
4.3.1.2 Definizione dell'unità funzionale .....	107
4.3.1.3 I confini del sistema .....	107
4.3.1.4 Elementi di analisi energetica .....	109
4.3.1.5 Energia, efficienza energetica ed exergia .....	109
4.3.1.6 Classificazione delle energie in una analisi energetica .....	110
4.3.1.7 Contenuto energetico dei materiali e richiamo sui combustibili .....	112
4.3.1.8 Energia per produrre i combustibili .....	113
4.3.2 La seconda fase di una LCA: introduzione all'analisi di inventario .....	115
4.3.2.1 Il problema dell'allocazione .....	116
4.3.2.2 I sistemi di trasporto .....	117
4.3.2.3 La gestione del "fine vita" nell'analisi di inventario .....	118
4.3.2.4 La raccolta .....	120
4.3.2.5 Il recupero di materia: riuso e riciclo .....	120
4.3.2.6 Il recupero di energia .....	121
4.3.2.7 La discarica .....	122
4.3.2.8 Aspetti metodologici principali .....	123
4.3.2.9 Risultati di un'analisi di Inventario .....	123
4.3.3 La terza fase di una LCA: l'analisi degli impatti (LCIA) .....	124
4.3.3.1 Selezione e definizione delle categorie di impatto .....	126
4.3.3.2 Classificazione .....	127
4.3.3.3 Caratterizzazione .....	128
4.3.3.4 Normalizzazione .....	129
4.3.3.5 Valutazione .....	130
4.3.4 Il metodo degli Eco-Indicator99 .....	130
4.3.5 La quarta fase di una LCA: interpretazione e miglioramento .....	148

5. Analisi del ciclo di vita della produzione di energia da gassificazione di biomassa .....	151
5.1 Obiettivo e campi di applicazione.....	151
5.1.1 Definizione degli scopi e degli obiettivi.....	151
5.1.2 Unità funzionale .....	151
5.1.3 Confini del sistema.....	151
5.1.4 Qualità dei dati .....	152
5.1.5 Metodologia di valutazione dell'impatto ambientale .....	152
5.2 Analisi di inventario .....	152
5.2.1 Il diagramma di flusso del processo ( <i>Process flow-chart</i> ) .....	152
5.2.2 La coltivazione .....	154
5.2.2.1 Descrizione botanica ed esigenze ambientali del pioppo.....	159
5.2.2.2 La tecnica di coltivazione e la raccolta .....	161
5.2.2.3 I macchinari utilizzati e i relativi calcoli per la LCA.....	163
5.2.2.3.1 Aratura .....	167
5.2.2.3.2 Erpicatura .....	168
5.2.2.3.3 Concimazione di fondo.....	169
5.2.2.3.4 Concime ternario 8-24-24.....	170
5.2.2.3.5 Trapianto.....	171
5.2.2.3.6 Diserbo antigerminello .....	173
5.2.2.3.7 Sarchiatura .....	175
5.2.2.3.8 Concimazione di copertura .....	176
5.2.2.3.9 Diserbo chimico localizzato.....	177
5.2.2.3.10 Pulizia dell'interfila .....	179
5.2.2.3.11 Trattamento insetticida .....	180
5.2.2.3.12 Intervento irriguo di soccorso .....	181
5.2.2.3.13 Raccolta .....	182
5.2.2.3.14 Trasporto del cippato fresco all'imposto .....	187
5.2.2.3.15 Ripristino del terreno .....	187
5.2.2.3.16 CO <sub>2</sub> immagazzinata .....	189
5.2.3 Logistica e stoccaggio .....	190

5.2.3.1 La logistica.....	190
5.2.3.2 Lo stoccaggio.....	191
5.2.3.2.1 Fenomeni degradativi .....	192
5.2.3.2.2 L'essiccazione naturale del cippato del pioppo .....	192
5.2.3.2.3 Sistemi di stoccaggio a confronto.....	196
5.2.3.3 Calcoli relativi alla macrofase di logistica e stoccaggio .....	201
5.2.4 Il processo produttivo.....	202
5.2.4.1 L'impianto di gassificazione.....	202
5.2.4.1.1 Layout impianto.....	205
5.2.4.1.2 Trattamento e carico cippato.....	205
5.2.4.1.3 Essiccatore .....	206
5.2.4.1.4 Vaglio .....	207
5.2.4.1.5 Serbatoio di stoccaggio.....	207
5.2.4.2 Modulo gassificatore.....	208
5.2.4.2.1 Il caricatore di cippato .....	209
5.2.4.2.2 Il reattore .....	210
5.2.4.2.3 Gli scambiatori di calore.....	212
5.2.4.2.4 Il filtro.....	214
5.2.4.2.5 Il sistema di scarico delle ceneri .....	215
5.2.4.2.6 Il filtro secondario di sicurezza.....	215
5.2.4.3 Circuiti ausiliari del gassificatore .....	216
5.2.4.3.1 Il circuito idraulico .....	216
5.2.4.3.2 Il quadro elettrico.....	216
5.2.4.3.3 Il circuito pneumatico .....	217
5.2.4.3.4 Il circuito dell'aria di alimentazione del reattore .....	217
5.2.4.3.5 Il tubo di scarico esterno e torcia .....	217
5.2.4.4 Caratteristiche tecniche impianto di gassificazione (materiali) .....	218
5.2.4.5 Il cogeneratore .....	220
5.2.5 Smaltimento ceneri.....	222
5.2.6 Assemblaggio del sistema .....	222
5.3 Valutazione degli impatti.....	223

5.3.1 LCIA Coltivazione .....	224
5.3.1.1 Confronto tra coltivazione con e senza irrigazione .....	231
5.3.2 LCIA Stoccaggio .....	234
5.3.2.1 Confronto tra diverse distanze dall'impianto di gassificazione .....	238
5.3.3 LCIA Assemblaggio impianto di gassificazione .....	243
5.3.4 LCIA Assemblaggio impianto cogenerativo .....	245
5.3.5 LCIA dell'intero sistema .....	247
5.3.6 LCIA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento .....	258
5.3.7 LCIA con metodo EPD (2008) .....	260
5.3.8 Confronto con altri impianti di generazione .....	263
5.3.9 Confronto delle emissioni di CO <sub>2</sub> con la produzione elettrica italiana .....	266
6. CONCLUSIONI .....	271
APPENDICE A .....	275
APPENDICE B .....	277
BIBLIOGRAFIA .....	279
SITOGRAFIA .....	282

# INTRODUZIONE

---

L'energia svolge un ruolo fondamentale nella vita di ognuno di noi. La richiesta di energia risulta costantemente in aumento anche per far fronte ad un costante aumento della popolazione mondiale.

Ci troviamo in un sistema caratterizzato da un'economia globale che richiede sempre maggiori quantità di energia ed a costi minori a discapito dell'ambiente e del genere umano stesso.

Quasi la totalità di energia deriva da fonti esauribili e quindi è destinata a breve termine a finire; una delle sfide della comunità scientifica è proprio quella di portare l'attenzione verso un più corretto uso dell'energia, nell'ottica dell'ottimizzazione dell'uso e della minimizzazione degli sprechi, e un'introduzione ed utilizzazione nel corso degli anni di energie rinnovabili.

La ricerca di nuove fonti di energia e lo sfruttamento di energie rinnovabili si sta muovendo su vari fronti con la consapevolezza di dover prima o dopo modificare l'abuso di fonti fossili quali il carbone e il petrolio.

In questo lavoro di tesi, dopo una presentazione iniziale del panorama energetico mondiale e del PEN italiano, verrà affrontata un'analisi LCA della produzione di energia da gassificazione di biomassa.

Il sistema analizzato comprende, oltre al processo produttivo, la fase di coltivazione e di smaltimento delle ceneri prodotte dal gassificatore; il tutto sarà inserito nel contesto agricolo ed industriale del nord-est dell'Italia.

Sarà esposta e spiegata la metodologia LCA: "*life cycle assessment*". La fase di inventario del ciclo di vita sarà sviluppata con l'ausilio del programma SimaPro 7 e la fase di interpretazione dei risultati applicando i metodi contenuti all'interno del programma stesso.

Lo scopo della tesi è quello di valutare gli impatti relativi alla produzione di energia da gassificazione di biomassa e di confrontare i risultati con gli impianti di produzione di energia tradizionale relativi alla situazione italiana.



# 1. CONTESTO ENERGETICO

---

Prima di introdurre il tema principale della tesi è necessario contestualizzare la risorsa energetica delle biomasse all'interno del panorama energetico mondiale. Questo lo si può fare analizzando la situazione energetica mondiale con particolare attenzione alle fonti rinnovabili, di cui le biomasse fanno parte.

La domanda energetica nel mondo continua a salire trainata da due principali fattori:

- *La crescita economica.* La domanda di energia segue marcatamente l'andamento del PIL (Prodotto Interno Lordo);
- *L'aumento della popolazione mondiale.* La popolazione mondiale nel 2010 era di circa 6,9 miliardi di persone e si stima che nel 2035 si potrà arrivare a 8,6 miliardi, con un tasso di crescita annuo che si attesta sullo 0,9%. Va sottolineato che la crescita della popolazione interessa i paesi non OECD, soprattutto Asia e Africa. La popolazione dei paesi OECD cresce solo dello 0,4% annuo.

Dal grafico in figura 1 si può notare la crescente domanda di energia del mondo.

[Fonte: IEA: *International Energy Agency*]

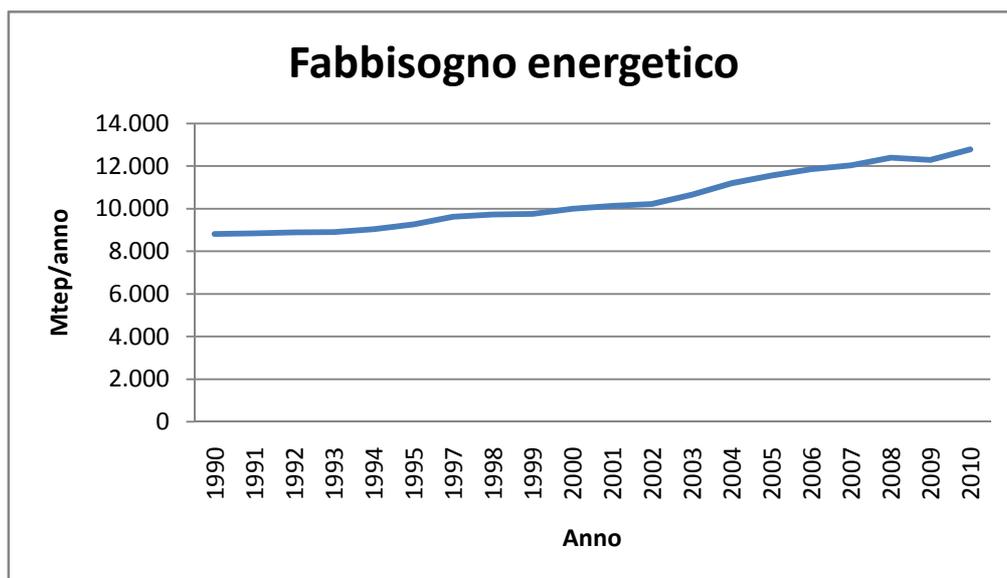


Figura 1.0.1

Attualmente il sistema energetico è basato sulle fonti primarie di origine fossile, vale a dire costituite da riserve di combustibili naturali formatisi in milioni di anni nel corso dell'evoluzione della terra e che si sono conservati nelle profondità della crosta terrestre.

Queste vengono utilizzate per soddisfare l'82% del fabbisogno globale e sono costituite essenzialmente da petrolio (32%), carbone (29%) e gas naturale (21%).

Un altro 6% del fabbisogno globale è coperto da materiale fissile (essenzialmente Uranio 235, ricavato dall'Uranio naturale) utilizzato in centrali nucleari.

È quindi evidente che l'88% circa della produzione energetica mondiale è soddisfatto da fonti primarie destinate ad esaurirsi.

Di conseguenza circa il 12% è coperto da fonti rinnovabili quali impianti idroelettrici, biomasse, eolico, solare e geotermico. Vedi figura 1.0.2.

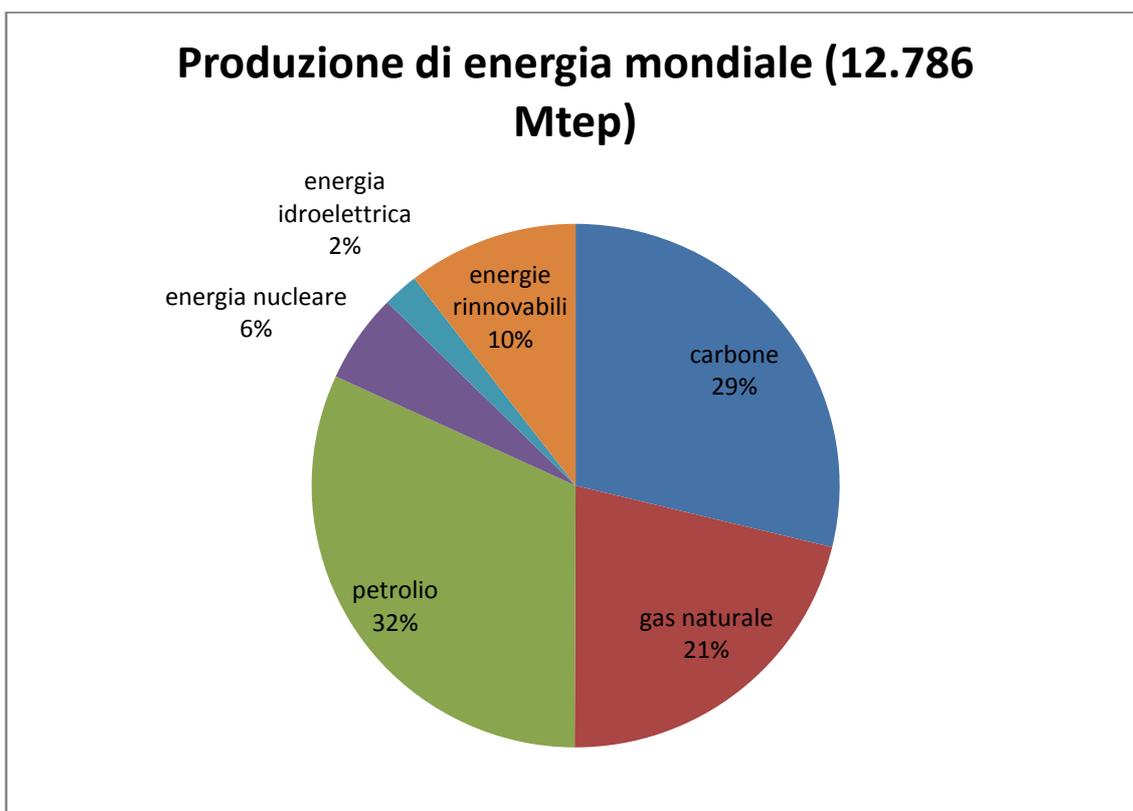


Figura 1.0.2 Fonti di energia nel contesto energetico mondiale

Da questo quadro generale si può comprendere il problema che si dovrà affrontare negli anni futuri. Le riserve dei combustibili fossili sono destinate ad esaurirsi, il rapporto tra riserve e produzione per fonte è uno strumento utile per capire quando questo succederà:

- Le riserve certe di petrolio nel mondo saranno in grado di soddisfare le richieste per altri 46 anni;
- Le riserve di carbone registrate nel 2010 sono in grado di soddisfare la richiesta mondiale per almeno altri 118 anni;
- Le attuali riserve certe di gas naturale saranno sufficienti a soddisfare i prossimi 58,6 anni di produzione globale.

[Fonte: Rielaborazione dati *BP Statistical Review of World Energy*-June 2011]

Riguardo al problema dell'esauribilità degli idrocarburi bisogna considerare anche il fatto che questi prodotti non servono soltanto per la combustione, ma sono importantissimi anche per altri usi come per esempio la produzione di materie plastiche e l'industria petrol-chimica.

All'utilizzo degli idrocarburi sono legati innumerevoli problemi di emissioni, specialmente di CO<sub>2</sub> che presenta un forte impatto sul clima a scala globale contribuendo all'effetto serra.

Anche da queste considerazioni scaturiscono gli impegni presi nel protocollo di Kyoto, il quale ha come obiettivo di ridurre le emissioni dei gas "ad effetto serra" di natura antropica (causa del riscaldamento globale):

- biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>);
- metano (CH<sub>4</sub>);
- protossido di azoto (N<sub>2</sub>O);
- idrofluorocarburi (HFC);
- perfluorocarburi (PFC);
- esafluoro di zolfo (SF<sub>6</sub>).

Il Protocollo di Kyoto fu firmato nel dicembre del 1997 da oltre 160 Paesi in occasione della Conferenza COP3<sup>1</sup> della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) ed il riscaldamento globale ed è entrato in vigore il 16 febbraio 2005. Il trattato ha come scopo la riduzione delle emissioni di biossido di carbonio e altri cinque gas serra in una misura non inferiore al 5,2% nel periodo che va dal 2008 al 2012, rispetto alle emissioni misurate nel 1990, che è l'anno di riferimento. Il protocollo stabilisce l'esistenza di quote di

---

<sup>1</sup> Conference of parts (conferenza delle parti)

emissioni dei suddetti gas e che queste siano oggetto di scambio. In base ai calcoli fatti si prevede che i Paesi industrializzati riducano del 5% le proprie emissioni di anidride carbonica (o biossido di carbonio, CO<sub>2</sub>).

La ratificazione del trattato è avvenuta in modo graduale e la condizione che firmassero nel complesso i produttori di almeno il 55% delle emissioni è stata raggiunta nel 2004, con l'adesione della Russia, responsabile del 17,4% delle emissioni globali.

L'Europa si è impegnata a ridurre le proprie emissioni di gas serra al 2012 dell'8% rispetto alle emissioni del 1990.

L'Italia si è impegnata a ridurre le proprie emissioni di gas serra al 2010 del 6,5% rispetto a quelle del 1990.

Il protocollo di Kyoto prevede due tipi di strumenti per conseguire le riduzioni proposte:

- Politiche e misure.

Sono quegli interventi previsti dallo Stato attraverso programmi attuativi specifici realizzati all'interno del territorio nazionale (miglioramento dell'efficienza energetica, promozione di forme di agricoltura sostenibili, sviluppo di fonti di energia rinnovabili, ecc.);

- Meccanismi flessibili.

Sono strumenti che danno la possibilità di utilizzare a proprio credito attività di riduzione delle emissioni effettuate al di fuori del territorio nazionale.

Questo è permesso considerando il fatto che i cambiamenti climatici sono un fenomeno globale ed ogni riduzione delle emissioni di gas serra è efficace indipendentemente dal luogo del pianeta nel quale viene realizzata.

Si distinguono tre tipi di meccanismi flessibili:

- *CDM* Clean Development Mechanism (mercato delle quote di emissione): consente ai paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti nei paesi in via di sviluppo, che producano benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas-serra e di sviluppo economico e sociale dei Paesi ospiti e nello stesso tempo generino crediti di emissione per i Paesi che promuovono gli interventi;
- *JI* Joint Implementation (implementazione congiunta): consente ai paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti per la riduzione delle emissioni di gas-serra in un altro paese dello stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti assieme al paese ospite;

- *ET* Emissions Trading (mercato delle quote di emissione): consente lo scambio di crediti di emissione tra paesi industrializzati e ad economia in transizione; per esempio, un paese che abbia ottenuto una diminuzione delle proprie emissioni di gas serra superiore al proprio obiettivo può cedere i "crediti" ad un paese che non sia stato in grado di raggiungere gli obiettivi di abbassamento delle emissioni inquinanti.

In sintesi non importa dove vengano attuati progetti di risparmio energetico e di mancate emissioni, l'importante è attuarli e dirigere gli sforzi nella stessa direzione.

Alla fine del 2008 il parlamento ed il Consiglio Europeo hanno adottato, nel quadro della procedura di codecisione, il pacchetto legislativo clima-energia denominato 20-20-20, che si pone come obiettivo entro il 2020 di:

- Ridurre del 20% le emissioni di gas effetto serra
- Portare al 20% il risparmio energetico
- Aumentare al 20% l'apporto delle energie rinnovabili sui consumi finali di energia

Nell'ambito delle azioni legislative che compongono il pacchetto clima-energia, il Parlamento ed il Consiglio Europeo hanno emanato la Direttiva 2009/28/CE del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, con l'intendimento di rendere realizzabile il terzo degli obiettivi 20-20-20 più sopra elencati, contribuendo anche a centrare gli altri due.

A tale scopo, la Direttiva Europea fissa obiettivi nazionali diversificati e cogenti per garantire che entro il 2020, una media del 20% del consumo finale di energia della UE provenga da fonti rinnovabili.

All'Italia è stato assegnato l'obiettivo del 17%, partendo dal 5,2% del 2005.

Nel dicembre 2012 a Doha è stato approvato il "*Doha climate gateway*" che delinea le caratteristiche della seconda fase del protocollo di Kyoto.

Il secondo periodo d'impegno del Protocollo di Kyoto (2CP) avrà una durata di 8 anni (dal 1° gennaio 2013 al 31 dicembre 2020), e tutte le parti ad esso aderenti saranno soggette a degli obblighi di riduzione delle emissioni che potranno essere implementati, tramite politiche nazionali, per raggiungere livelli più ambiziosi; è stato dunque identificato nel 2014 l'anno di

revisione, in corrispondenza con l'uscita del V Rapporto IPCC<sup>2</sup> che aggiornerà i propri modelli indicando le misure necessarie per ridurre al minimo gli effetti dei cambiamenti climatici.

Sebbene siano insufficienti a garantire l'aumento di temperatura media globale al di sotto dei 2°C (e tantomeno a risolvere la crisi climatica), gli impegni di riduzione previsti dal 2CP soddisfano le aspettative minime riposte sulla COP18 non solo per mantenere in vita l'unico strumento vincolante esistente, ma soprattutto per garantire una fase di transizione regolamentata fino al raggiungimento del nuovo accordo globale (previsto per il 2015). L'accordo pone limiti importanti ai cosiddetti *carry-over* (il trasferimento dei crediti dal primo al secondo periodo d'impegno), che non potranno superare il 2.5% delle quantità di emissioni assegnate al fine di non vanificare le nuove misure di mitigazione intraprese; Si è poi stabilito che l'accesso ai meccanismi di *emission trading* relativi all'acquisto e al trasferimento di CERs (Certified Emission Reductions), AAUs, ERUs (Emission Reduction Units) e RMUs (Removal Units) sia riservato esclusivamente ai paesi che abbiano presentato impegni di riduzione per il secondo periodo d'impegno.

Restano invece fuori dal 2CP Canada, Giappone, Nuova Zelanda, Russia e Turchia, oltre agli USA (che non hanno mai aderito al Protocollo di Kyoto e responsabili del 36,1% delle totali emissioni).

L'impegno di riduzione dell'Unione Europea per il secondo periodo del protocollo di Kyoto è del -20% (estendibile al -30%) rispetto al 1990.

Ogni Stato membro è tenuto ad adottare un *Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili* (PAN), individuando le strategie e le misure attuative per migliorare l'efficienza energetica nel consumo di energia e per incrementare il ruolo delle fonti rinnovabili nei settori dei trasporti, dell'elettricità e del riscaldamento/raffreddamento degli ambienti.

---

<sup>2</sup> L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) è il gruppo intergovernativo di esperti sui cambiamenti climatici fondato nel 1988 dall'UNEP (United Nations Environment Programme) e dal WTO (World Meteorological Organization). Organo scientifico e principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici, cui prendono parte oggi 195 Paesi.

## 1.1 Il PAN italiano

L'Italia ha adottato il suo PAN nel giugno 2010 e sarà aggiornato nel caso in cui si manifestino nel tempo scostamenti significativi.

Inoltre con il *Decreto Legislativo 3/3/2011, n. 28* ha definito modalità e criteri per l'attuazione delle misure previste dal PAN, in coerenza con le indicazioni della direttiva europea 28 del 2009.

### 1.1.1 Strategia

Nel PAN sono sintetizzate la strategia e le linee di azione del Governo italiano nello sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili; tra gli obiettivi generali assumono particolare rilievo:

- la *sicurezza degli approvvigionamenti energetici*, considerato che l'Italia dipende fortemente dalle importazioni di energia. Le interruzioni della fornitura di petrolio in conseguenza delle vicende politiche in Libia nel 2011 e le riduzioni delle forniture di gas dalla Russia attraverso l'Ucraina sono recenti esempi della problematicità della situazione;
- la *riduzione delle emissioni di gas dannosi per il clima* (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ...) secondo gli impegni assunti a livello internazionale (accordo di Kyoto e seguenti);
- il *miglioramento della competitività dell'industria nazionale* attraverso il sostegno alla domanda di tecnologie rinnovabili e lo sviluppo dell'innovazione tecnologica. Lo sviluppo delle fonti rinnovabili può costituire per il Paese un elemento di sviluppo economico, di occupazione e di investimenti.

Per i diversi settori di intervento sono delineate le linee di azione.

#### Consumi finali per riscaldamento/raffrescamento

Questi consumi rappresentano una porzione molto rilevante dei consumi finali nazionali; lo sviluppo delle fonti rinnovabili assume quindi primaria importanza e andrà perseguito con:

- azioni sulle infrastrutture, tra cui lo sviluppo di reti di *teleriscaldamento*, la diffusione di *cogenerazione* con maggiore controllo dell'uso del calore, l'immissione di *biogas* nella rete di distribuzione del gas naturale;

- promozione di un utilizzo diffuso delle rinnovabili a copertura dei fabbisogni di calore negli edifici, accompagnato a un miglioramento dell'efficienza energetica.

### **Consumi di carburante nel settore dei trasporti**

Il consumo di carburante nel settore dei trasporti rappresenta la seconda voce nel consumo finale di energia.

Le linee d'azione principali sono:

- *miglioramento dell'efficienza* energetica nei trasporti;
- *ampliamento dell'apporto di biocarburanti* nei consumi. In Italia l'attuale capacità produttiva di biocarburanti è valutata in circa 2·106 t/anno; oltre all'importazione di materia prima per produrli è prevedibile anche l'importazione di una quota di biocarburanti;
- *ampliamento del ricorso all'elettricità* nel trasporto.

### **Consumi finali di energia elettrica**

I consumi di energia elettrica rappresentano una quota crescente nella composizione del consumo finale di energia; lo sviluppo delle fonti rinnovabili nella produzione di energia elettrica resta pertanto una linea d'azione strategica.

Gli impianti alimentati da fonti rinnovabili hanno un accesso prioritario alla rete a condizioni tecnico-economiche privilegiate rispetto agli impianti tradizionali; hanno diritto alla priorità di dispacciamento e a forti riduzioni dei corrispettivi di connessione alla rete, che vengono distribuiti sulle bollette degli utenti.

L'obiettivo è quello di raccolta integrale della producibilità rinnovabile attraverso sistemi di accumulo e stoccaggio dell'energia elettrica non immettibile in rete.

Per integrare nel sistema elettrico la crescita della generazione da fonti rinnovabili, dovuta principalmente agli impianti eolici nell'Italia meridionale e insulare, è previsto un piano di sviluppo di nuove linee elettriche e il potenziamento dell'esistente rete di trasmissione e di distribuzione.

Per elevare la percentuale di consumi elettrici coperti da fonti rinnovabili garantendo allo stesso tempo efficienza e costi accettabili, è necessario che il sistema elettrico sia adeguato nelle sue infrastrutture; in particolare, occorre puntare alla realizzazione delle cosiddette *reti*

*intelligenti*, capaci di realizzare forme efficienti di stoccaggio, accumulo, raccolta e smistamento dell'energia elettrica prodotta.

Infatti le fonti rinnovabili hanno caratteristiche peculiari di intermittenza (il sole e il vento non garantiscono livelli di produzione costanti) e di diffusione sul territorio; alle grandi centrali si affiancano molteplici impianti diffusi sul territorio (per esempio, fotovoltaici), da connettere con la rete in modo efficiente e programmato.

### **1.1.2 Consumi finali di energia e obiettivi per le energie rinnovabili**

Gli obiettivi del PAN sono da raggiungere entro il 2020; i confronti percentuali sono calcolati rispetto ai valori del 2005, anno preso come riferimento a livello europeo.

Nel 2005 il consumo finale di energia in Italia è stato pari a 141,2 Mtep; nel 2008 è sceso a 131,6 Mtep. Tenendo conto dell'effetto della crisi economica e delle misure di risparmio energetico programmate in accordo con l'obiettivo europeo di riduzione del 20%, la stima dei consumi finali del nostro Paese nel 2020 potrebbe essere contenuta nel limite di 131,2 Mtep.

Per quanto riguarda gli obiettivi per le energie rinnovabili l'Italia ha assunto per l'anno 2020 l'obiettivo di coprire con energia da fonti rinnovabili il 17% dei consumi finali totali di energia. L'obiettivo assegnato è dunque misurato da:

$$\frac{FER}{CFL} \geq 17\%$$

Con il seguente significato dei termini:

**FER** = consumi da fonti di energia rinnovabili

È definito come somma dei seguenti termini:

- energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, escludendo per l'idroelettrico la produzione delle centrali di pompaggio che utilizzano l'acqua precedentemente pompata a monte. Negli impianti multi combustibili (centrali ibride) che utilizzano fonti rinnovabili e convenzionali, si tiene conto unicamente della parte di elettricità prodotta da fonti rinnovabili; il contributo di ogni fonte di energia è calcolato sulla base del suo contenuto energetico;
- l'energia da fonti rinnovabili fornita mediante teleriscaldamento e teleraffrescamento più il consumo di altre energie da fonti rinnovabili nell'industria, nelle famiglie, nei

servizi, in agricoltura, silvicoltura e pesca, per il riscaldamento, il raffreddamento e la lavorazione, compresa l'energia catturata dalle pompe di calore;

- il contenuto energetico dei biocarburanti che rispettano i criteri di sostenibilità;
- l'energia relativa alle misure di cooperazione internazionale previste dalla direttiva (trasferimenti statistici e progetti comuni con altri Stati membri o progetti comuni con Paesi terzi).

**CFL** = consumo finale lordo

È definito dalla direttiva europea come: *“i prodotti energetici forniti a scopi energetici all'industria, ai trasporti, alle famiglie, ai servizi, compresi i servizi pubblici, all'agricoltura, alla silvicoltura e alla pesca, ivi compreso il consumo di elettricità e di calore del settore elettrico per la produzione di elettricità e di calore, incluse le perdite di elettricità e di calore con la distribuzione e la trasmissione”*.

Oltre all'obiettivo generale sopra indicato, deve essere assicurata una quota di copertura dei consumi nel settore trasporti mediante energie da fonti rinnovabili pari al 10%:

$$\left(\frac{FER}{CFL}\right)_{tr} \geq 10\%$$

Nel calcolo del numeratore sono compresi:

- il contenuto energetico dei biocarburanti che rispettano i criteri di sostenibilità, moltiplicando per un fattore 2 il contenuto energetico dei biocarburanti di seconda generazione (biocarburanti prodotti a partire da rifiuti, residui, materie cellulosiche di origine non alimentare e materiali legnosi);
- l'energia elettrica da fonti rinnovabili consumata nei trasporti, moltiplicando per un fattore 2,5 la quota di questa consumata nei trasporti su strada.

Per il calcolo del denominatore di questo obiettivo sono inclusi esclusivamente la benzina, il diesel, i biocarburanti consumati nel trasporto su strada e su rotaia e l'elettricità, moltiplicando per un fattore 2,5 la quota di quest'ultima consumata nei trasporti su strada.

### **1.1.3 Misure di sostegno per il conseguimento degli obiettivi**

Gli investimenti nel settore delle energie rinnovabili non garantiscono, con l'attuale situazione di mercato delle fonti energetiche, livelli di remunerazione adeguati; l'Unione europea e i

singoli stati, con modalità diverse, hanno attivato meccanismi di sostegno per sostenere e garantire tali investimenti.

Tra le azioni di incentivazione si elencano:

- **i certificati verdi**

Produttori e importatori di energia elettrica da fonti convenzionali hanno l'obbligo di immettere in rete un quantitativo minimo di elettricità prodotto da fonti rinnovabili; se non lo fanno direttamente possono acquistare da produttori specializzati in fonti rinnovabili titoli comprovanti tale produzione, detti appunto certificati verdi;

- **la tariffa onnicomprensiva**

Agli impianti da fonti rinnovabili è riconosciuta sull'energia elettrica immessa in rete una tariffa fissa che comprende sia il pagamento dell'energia sia un incentivo all'investimento; è applicabile solo a impianti di potenza inferiore a 1 MW (200 kW nel caso degli eolici);

- **il conto energia**

Remunerazione costante dell'energia elettrica prodotta da impianti solari fotovoltaici (per 20 anni) e termodinamici (per 25 anni), che va a sommarsi agli eventuali ricavi della vendita;

- **i titoli di efficienza energetica o certificati bianchi**

Titoli che certificano la riduzione dei consumi ottenuta in progetti di risparmio energetico nei settori industriali, dei servizi e del residenziale; possono essere utilizzati per assolvere agli obblighi di incremento dell'efficienza energetica che la normativa ha imposto ai grandi distributori di energia elettrica e di gas naturale. Gli interventi di risparmio possono essere realizzati dagli stessi distributori di energia, da società di servizi energetici o da altri soggetti e i relativi certificati possono essere venduti;

- **le agevolazioni fiscali**

Nel settore del riscaldamento e del raffreddamento l'uso delle fonti di energia rinnovabili è incentivato con la possibilità di detrarre dall'imposta sul reddito il 55% del totale delle spese sostenute per l'intervento.

Altre misure per la promozione delle fonti rinnovabili prevedono obblighi di legge nel settore dei trasporti e del riscaldamento degli edifici:

- **quota minima di biocarburanti**

Nel settore trasporti il principale meccanismo nazionale per la promozione delle energie rinnovabili è costituito dall'obbligo per i fornitori di carburanti di immettere

una percentuale obbligatoria minima di biocarburanti, variabile di anno in anno. La normativa attuale impone di raggiungere il 5% nel 2014.

Il biocarburante (*biofuel*) è un combustibile ottenuto da biomasse. Sono considerati biocarburanti:

- il bioetanolo;
- il biodiesel;
- il biometanolo;
- il biodimetilere;
- gli idrocarburi sintetici;
- il bioidrogeno;
- gli oli vegetali.

L'utilizzo dei biocombustibili può presentare alcune rilevanti problematiche negative:

- sottrazione di terreno agricolo alla produzione di alimenti e conseguente riduzione della disponibilità di derrate alimentari e rincaro dei generi alimentari;
- massiccio uso di pesticidi inquinanti;
- deforestazioni.

Inoltre in alcuni casi l'emissione di CO<sub>2</sub> in fase di produzione dei biocarburanti può essere decisamente molto elevata.

I cosiddetti *biocarburanti di seconda generazione*, su cui si sta concentrando la ricerca, sono ottenuti con il processo di pirolisi da biomasse non destinate a uso alimentare, per esempio rifiuti o materiale cellulosico. La pirolisi consente di trasformare direttamente sul luogo la biomassa raccolta in uno speciale olio, che viene successivamente inviato presso un impianto centralizzato per la sintesi dei carburanti veri e propri, abbattendo notevolmente le spese di trasporto.

- **Nuovi edifici o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti**

Gli impianti di produzione di energia termica di edifici nuovi (o di edifici esistenti su cui si compiano rilevanti ristrutturazioni) devono essere progettati e realizzati in modo da:

- garantire almeno il 50% del fabbisogno termico (20% per edifici in centri storici) per l'acqua calda sanitaria con impianti alimentati da fonti rinnovabili;

- garantire un contributo da fonti rinnovabili per la copertura del fabbisogno termico totale (acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento) pari al:
  - a. 20% fino al 31 dicembre 2013;
  - b. 35% fino al 31 dicembre 2016;
  - c. 50% dal 1° gennaio 2017.

Dall'obbligo sono esclusi gli edifici allacciati a una rete di teleriscaldamento che copra l'intero fabbisogno di calore sia per il riscaldamento degli ambienti sia per la fornitura di acqua calda sanitaria.

Nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra o all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze è calcolata secondo la seguente formula:

$$P = \frac{S}{K} \quad [kW]$$

$S$  (m<sup>2</sup>) è la superficie in pianta dell'edificio al livello del terreno;

$K$  (m<sup>2</sup>/kW) è un coefficiente che assume i seguenti valori:

- a.  $K = 80$  fino al 31 dicembre 2013;
- b.  $K = 65$  fino al 31 dicembre 2016;
- c.  $K = 50$  dal 1° gennaio 2017.

Gli eventuali pannelli solari termici o fotovoltaici disposti sui tetti degli edifici componenti devono essere aderenti o integrati nei tetti medesimi, con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda. Per gli edifici pubblici gli obblighi precedenti sono incrementati del 10%.

- **Integrazione del biogas nella rete del gas naturale**

Le norme favoriscono un ampio utilizzo del *biometano* (gas ottenuto dal trattamento di purificazione del biogas) nella misura in cui esso possa essere iniettato e trasportato nel sistema del gas naturale senza generare problemi tecnici o di sicurezza.

Per promuovere efficacemente l'utilizzo del gas prodotto da fonte rinnovabile rispetto al gas di origine fossile sono introdotte apposite forme di incentivazione da applicare alla quantità di biometano immesso nella rete del gas naturale. Per l'ottimale valorizzazione dell'utilizzo del biometano è introdotta una garanzia d'origine anche

per poterlo convenientemente utilizzare nel settore del riscaldamento civile, terziario o industriale.

- **Reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento**

Lo sviluppo del teleriscaldamento e del teleraffrescamento, soprattutto se abbinato alla cogenerazione, può ricoprire un ruolo significativo ai fini del raggiungimento degli obiettivi; il teleriscaldamento gode di alcune forme di incentivazione quali i titoli di efficienza energetica e un regime di credito d'imposta a favore degli utenti finali.

Nuovo impulso allo sviluppo del teleriscaldamento e del teleraffrescamento può discendere da:

- valorizzazione energetica dei rifiuti a valle della raccolta differenziata;
- valorizzazione delle biomasse di scarto in distretti agricoli e industriali;
- previsione di reti di trasporto di calore geotermico.

## 1.2 Fonti energetiche

Si definiscono *fonti primarie* di energia quelle presenti in natura prima di aver subito qualunque trasformazione.

Sono fonti primarie sia le fonti di energia esauribile quali il petrolio grezzo, gas naturale, carbone, materiale fissile sia le fonti di energia rinnovabile, ottenibili dalla risorsa solare, dalla risorsa eolica, dalla risorsa idrica, dalle biomasse e dalla geotermia.

Si definiscono invece *fonti secondarie* quelle che derivano, in qualunque modo, da una trasformazione di quelle primarie. Esempi possono essere la benzina (dal trattamento del petrolio greggio), il gas di città (dal trattamento del gas naturale), l'energia elettrica (trasformazione di energia meccanica o chimica), ecc.

Affinché una fonte primaria possa essere sfruttata deve avere alcune caratteristiche particolari, deve essere: concentrabile, indirizzabile, frazionabile, continua e regolabile.

Concentrabile in quanto deve essere possibile concentrare la sorgente di energia entro un'area relativamente limitata per poterla controllare, altrimenti sarebbe impossibile gestirla.

Indirizzabile vuol dire che deve essere possibile indirizzare il prodotto (benzina, acqua, raggi solari) nella direzione in cui esso deve essere utilizzato (bruciatore, turbina, lente, specchio).

Frazionabile in quanto deve essere possibile frazionare la fonte in più parti, in modo da poterne utilizzare una parte quando serve.

Continua vuol dire che la sorgente deve poter funzionare per un certo tempo, fornendo la sua energia con una certa continuità e non esaurirsi in pochi secondi.

Regolabile cioè graduabile secondo la necessità.

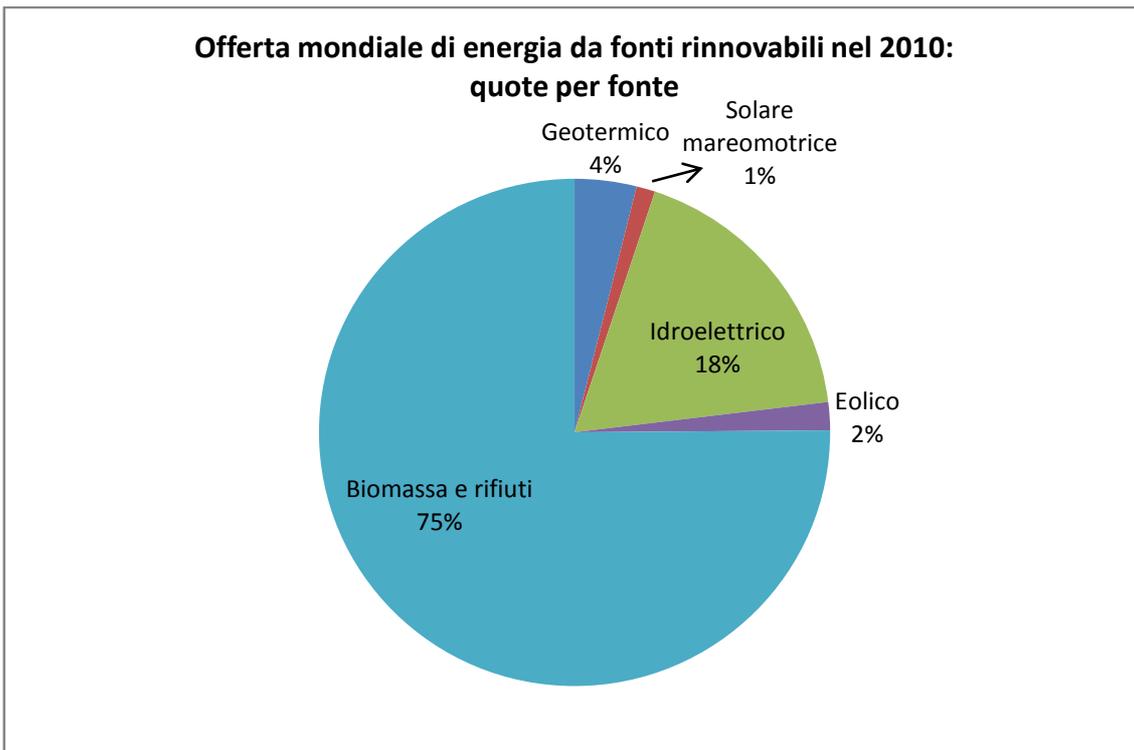
Maggiori sono queste peculiarità più pregiata risulta la fonte di energia.

## **1.3 Fonti di energia rinnovabili**

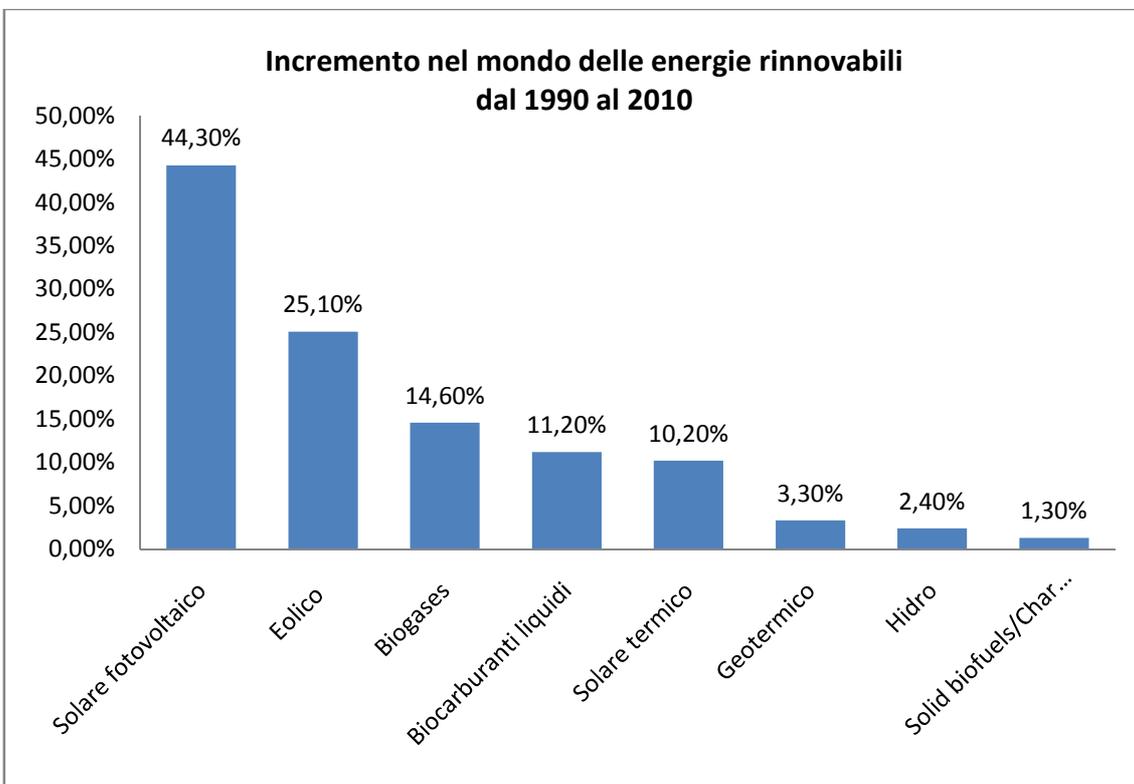
Le fonti di energia rinnovabile (FER) sono in larga parte derivanti dall'energia solare, generatrice di quasi tutta l'energia del nostro sistema solare. Le FER sono dette anche fonti alternative, termine improprio in quanto in origine sono state proprio le fonti esauribili come il carbone e il petrolio ad essere alternative alle fonti rinnovabili come la legna e la forza cinetica dell'acqua, del vento, utilizzate ben prima dei combustibili fossili.

Ora facciamo una panoramica sulle varie fonti rinnovabili, in particolar modo sulla loro offerta di energia nel mondo (figura 1.0.3) e sul loro incremento rispetto al 1990 (figura 1.0.4):

[Fonte: IEA: *International Energy Agency*]



**Figura 1.0.3**



**Figura 1.0.4**

Tutta l'energia rinnovabile (fatta eccezione per l'energia delle maree e quella geotermica) in ultima analisi proviene dal sole.

Il sole irradia la terra con  $1,74 \cdot 10^{14}$  chilowattora di energia ogni ora, di cui assorbe  $1,22 \cdot 10^{14}$  kW.

Le risorse energetiche rinnovabili si possono considerare in questo modo:

- Risorsa solare primaria
  - Radiazione solare
    - Fotovoltaico
    - Solare termico
- Risorse solari secondarie
  - Biomassa
  - Eolico
  - Idroelettrico

Vengono descritte in questo capitolo, in breve le principali fonti di energia rinnovabile, con particolare attenzione alle biomasse che costituiscono l'argomento centrale della tesi.

## 1.4 Risorsa solare: il fotovoltaico

La tecnologia fotovoltaica consiste nella trasformazione diretta della luce solare in energia elettrica mediante l'impiego di dispositivi che utilizzano l'effetto fotovoltaico, basato cioè sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori in grado di convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica, senza parti meccaniche in movimento e senza l'uso di alcun combustibile.

Gli impianti fotovoltaici possono essere distinti in due categorie:

- Impianti isolati (*stand-alone*): sono impianti la cui energia prodotta in esubero viene accumulata in apposite batterie.
- Impianti collegati alla rete elettrica (*grid-connected*): sono impianti che oltre a produrre l'energia elettrica per l'utenza, immettono in rete l'energia in esubero. Vengono usati dove l'energia elettrica da fonte convenzionale risulta molto costosa o dove ha un forte impatto ambientale.
- Centrali di produzione di energia elettrica, generalmente collegata alla rete in media tensione.

La vita media dei moduli fotovoltaici è superiore ai 20 anni, mentre altri dispositivi del sistema hanno vita media più bassa come le batterie (da 2 a 15 anni) e i componenti elettronici che sono molto sensibili e con vita media molto variabile.

I vantaggi di questa tecnologia sono:

- buona affidabilità e basso livello di manutenzione;
- assenza di rumore durante il funzionamento;
- modesto impatto ambientale;
- fonte energetica gratuita.

Gli svantaggi sono:

- discontinuità della fonte energetica;
- costi elevati di impianto;
- spazi di installazione elevati.

La dimensione dell'impianto fotovoltaico è in funzione dell'energia richiesta e quindi quest'ultima determina la potenza da installare, il numero di moduli necessari, il costo del sistema e il costo del kilowattora elettrico generato.

## **1.5 Risorsa solare: il solare termico**

Questa è una tecnologia che sfrutta l'energia solare per il riscaldamento di acqua o aria. È una tecnologia che si presta alle utenze che richiedono la produzione di acqua calda e il riscaldamento di ambienti.

Il sole fornisce energia attraverso la radiazione solare, la quale è raccolta e convertita in energia termica tramite i collettori solari.

Gli elementi fondamentali che costituiscono questo impianto sono i pannelli o collettori, all'interno dei quali viene riscaldato il liquido del circuito, e i serbatoi di accumulo all'interno dei quali si immagazzina l'acqua calda prodotta.

Tali impianti possono essere raggruppati in due categorie principali: gli impianti a circolazione naturale e quelli a circolazione forzata.

I vantaggi sono:

- riduzione dei consumi di combustibile per il riscaldamento;
- risparmio economico sulle bollette;

- riduzioni delle emissioni inquinanti e dei gas serra.

Gli svantaggi sono:

- maggiore costo di investimento iniziale per l'impianto;
- necessità di trovare un luogo idoneo per la messa in opera dell'impianto.

## 1.6 Risorsa eolica

Circa 1-2% dell'energia proveniente dal sole viene convertita in energia eolica, che risulta essere circa 50-100 volte maggiore dell'energia convertita in biomasse da tutte le piante del nostro pianeta.

Gli impianti eolici utilizzano l'energia del vento, trasformandola dapprima in energia meccanica (movimento delle pale) e poi tramite un generatore in energia elettrica.

Un impianto eolico produce elettricità mediante gli aerogeneratori che sfruttano lo stesso principio di funzionamento dei mulini a vento.

Esistono principalmente due famiglie di rotor eolici:

- VAWT (*Vertical Axis Wind Turbines*) rotor ad asse verticale, I quali non necessitano di mutare orientamento al variare della direzione di provenienza del vento. Di questa tipologia fanno parte i rotor Savonius, che sfrutta la resistenza opposta al vento del rotore, e Darrieus o il rotore H, i quali sfruttano la portanza del vento avendo pale a profilo aerodinamico alare.
- HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbines*) rotor ad asse orizzontale, di questa famiglia fanno parte solo rotor a portanza e necessitano di un meccanismo di orientamento in base alla provenienza del vento. Comprendono turbine a una, due o tre pale, le cosiddette turbine olandesi a quattro pale (derivate dagli storici mulini a vento) e le cosiddette turbine americane a gran numero di pale (chiamate multipala).

Più aerogeneratori collegati assieme formano le cosiddette “*wind farm*”, fattorie del vento, che sono delle vere e proprie centrali elettriche.

Molto interessante nei nostri giorni risulta essere il “micro-eolico” che utilizza macchine eoliche in grado di generare fino a 20 kW destinate all'auto-consumo e macchine da 20 a 100 kW considerate di uso industriale.

Per produrre energia elettrica in quantità sufficiente è necessario che il luogo di installazione degli aerogeneratori sia molto ventoso. I siti favorevoli all'installazione di turbine eoliche

devono almeno avere velocità medie annuali del vento di 4,5 m/s, con vento a carattere costante durante l'intero anno, con basso livello di turbolenza e limitate raffiche.

Vantaggi:

- il vento è naturalmente disponibile e non inquinante;
- l'energia eolica può essere utilizzata sia per produrre lavoro meccanico che elettrico.

Svantaggi:

- Non possono essere installate ovunque si voglia;
- Impatto ambientale non trascurabile.

## 1.7 Risorsa idroelettrica

La tecnologia idroelettrica è la più matura tra le fonti rinnovabili, già i Romani avevano riconosciuto la presenza nell'acqua in moto di due diverse forme di energia quali:

- L'energia cinetica
- L'energia potenziale

Con l'avvento dell'industrializzazione si rese necessario disporre di maggiori e sempre crescenti quantità di energia, questo diede la spinta alla nascita delle moderne turbine idrauliche:

- PELTON
- FRANCIS
- KAPLAN

La potenza di un impianto idroelettrico dipende da due fattori:

- salto  $H$ : differenza di quota tra il punto di prelievo dell'acqua e il punto di restituzione;
- portata volumetrica  $Q$ : volume d'acqua prelevato nell'unità di tempo.

$$P = \eta \gamma Q H$$

Gli impianti idraulici si suddividono in base alla taglia di potenza nominale in:

- micro-impianti:  $P < 100$  kW
- mini-impianti:  $100 < P$  (kW)  $< 1.000$
- piccoli-impianti  $1.000 < P$  (kW)  $< 10.000$
- grandi-impianti  $P > 10.000$  kW

Gli impianti possono essere poi:

- ad acqua fluente: in tal caso non dispongono di alcuna capacità di regolazione degli afflussi, per cui la portata sfruttata coincide con quella disponibile nel corso dell'acqua (a meno di una quota detta DMV deflusso minimo vitale, necessaria per salvaguardare l'ecosistema);
- a deflusso regolato (a bacino): sono provvisti di una capacità di invaso alla presa del corso d'acqua atta a modificare il regime delle portate utilizzate dalla centrale;
- a pompaggio: sono impianti con tutte le caratteristiche degli impianti tradizionali a bacino, ma che ricavano la disponibilità di acqua nel serbatoio superiore anche mediante sollevamento elettromeccanico;
- inseriti in un canale o in una condotta per approvvigionamento idrico: l'acqua potabile è approvvigionata ad una città adducendo l'acqua da un serbatoio di testa mediante una condotta a pressione.

Vantaggi:

- affidabilità della fonte energetica;
- rispetto degli ecosistemi;
- bassi costi di manutenzione;
- elevata energia specifica;
- tecnologia ben sviluppata;
- non emettono effluenti inquinanti o sottoprodotti di scarto nocivo.

Attualmente nell'Unione Europea l'idroelettrico, sia "grande" sia "piccolo", contribuisce alla produzione di energia elettrica per una percentuale del 13% e consente una riduzione di CO<sub>2</sub> per circa 67 milioni di tonnellate l'anno.

Nel mondo la potenza installata è di 47.000 MW con un potenziale di sviluppo stimato intorno ai 180.000 MW.

## **1.8 Risorsa biomassa**

Con il termine Biomasse si intendono i materiali di origine biologica non fossile: residui agricoli e colture energetiche specializzate, residui forestali, scarti dell'industria agro-

alimentare e dell'industria del legno, reflui zootecnici, parti organiche dei rifiuti urbani. Partiamo da una prima classificazione della biomassa in biomassa legnosa e non legnosa.

- La biomassa legnosa è costituita da sostanze solide composte da emicellulosa, cellulosa e lignina, ovvero le biomasse lignocellulosiche, le quali rappresentano la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare, la fotosintesi che consente alle piante di convertire la CO<sub>2</sub> atmosferica in materia organica durante la loro crescita. La biomassa legnosa è presente nelle foreste, terreni boscosi, piantagioni agroindustriali, alberi fuori dalla foresta e fuori dai terreni boscosi.
- Per quanto riguarda la biomassa non legnosa ne fanno parte i raccolti agricoli ed i loro residui, i raccolti erbacei, i residui da processo, i residui animali e le parti organiche dei rifiuti solidi urbani.

L'interesse nei confronti di questa risorsa è aumentato considerevolmente nel tempo. Le biomasse sono una fonte rinnovabile di energia molto versatile, che può essere trasformata localmente in tutti i Paesi dell'Unione europea, consentendo di ridurre la dipendenza energetica da aree politicamente instabili. Inoltre, l'utilizzo delle biomasse porta a vantaggi ambientali, poiché, a differenza dei combustibili fossili, le biomasse ed i combustibili da esse derivati rilasciano nell'atmosfera, durante la combustione, una quantità d'anidride carbonica più o meno corrispondente a quella assorbita in precedenza dai vegetali durante il processo di crescita.

La biomassa ha tre applicazioni principali:

- *Biopower* (produzione di energia elettrica e termica)
- *Biofuels* (produzione di biocombustibili)
- *Bioproducts* (produzione di composti chimici)

Essa rappresenta la quarta fonte energetica mondiale dopo il carbone, il petrolio, e il gas naturale.

L'impiego delle biomasse a fini energetici limita quindi il rilascio di nuova anidride carbonica, principale responsabile dell'effetto serra. Altri vantaggi ecologici, legati all'impiego delle biomasse e dei combustibili derivati sono:

- la biodegradabilità, in caso di versamenti accidentali di biocarburanti nell'ambiente;
- l'assenza nei fumi di ossidi di zolfo, dal momento che lo zolfo non è contenuto nelle piante;
- la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto e di particolato.

- la coltivazione delle biomasse (legnose) può portare a considerevoli vantaggi sociali contribuendo, ad esempio, alla difesa del suolo in montagna e stimolando l'occupazione in zone rurali economicamente deboli;
- è una risorsa abbondante e diffusa.

Gli svantaggi sono:

- la sua combustione deve rispettare i limiti riguardo le emissioni;
- non gode di molta pubblicità e mancano i collegamenti necessari per incrementare l'intera filiera produttiva;
- costi elevati di sfruttamento e conversione in biocombustibili e biocarburanti;
- possibile sfruttamento incontrollato e distruzione di ecosistemi ambientali importanti biologicamente nei paesi in via di sviluppo per l'approvvigionamento di grandi quantità di biomassa.

Le tecnologie per il recupero di energia da biomassa sono molte e molti sono anche i prodotti energetici che si possono ottenere.

Se un prodotto è composto da molto carbonio e poca acqua è adatto per essere bruciato per ottenere calore o elettricità. Se invece ha molto azoto ed è umido può essere sottoposto ad un processo biochimico per trasformare le molecole organiche in metano o CO<sub>2</sub>.

Altri prodotti liquidi possono essere utilizzati come combustibili per i motori a benzina e diesel.

I processi di conversione delle biomasse in energia sono di due tipi:

Processi termochimici: sono basati sull'azione del calore che permette le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia e sono utilizzabili per i prodotti ed i residui cellulósici e legnosi in cui il rapporto C/N è superiore a 30 e l'umidità è inferiore al 30%.

Tra questi processi ci sono:

- Il *cofiring* (co-combustione), che consiste nella sostituzione di una percentuale di carbone con biomassa direttamente nella caldaia dell'impianto preesistente, riducendo le emissioni di protossido di azoto, di anidride solforosa e di CO<sub>2</sub>;
- La pirolisi, processo di decomposizione di materiali organici, ottenuto fornendo calore, a temperature comprese tra i 400°C e 800°C, in forte carenza di ossigeno, i cui prodotti possono essere gassosi, liquidi o solidi a seconda del metodo con cui viene eseguita e dei parametri di reazione;
- La gassificazione che è un processo di conversione del carbone e/o della biomassa in composti gassosi (ossido di carbonio, anidride carbonica, metano, idrogeno e miscela

di essi come il *syngas*) eseguito per reazioni con l'aria, ossigeno, vapore o loro miscele. Consiste nell'ossidazione incompleta di una sostanza in un ambiente ad elevata temperatura (900/1000°C) per la produzione di un gas combustibile (detto gas di gasogeno o *syngas*)

Processi di conversione di tipo chimico-fisico: permettono di ricavare energia per reazione chimica dovuta ad enzimi, funghi e micro-organismi, che si formano nella biomassa sotto particolari condizioni. Questi vengono utilizzati per le biomasse caratterizzate da un rapporto C/N inferiore a 30 e umidità della raccolta superiore al 30%. I processi biochimici ad opera di microrganismi possono essere anaerobici o aerobici a seconda, rispettivamente, dell'assenza o presenza di ossigeno.

Negli ultimi anni, le prospettive d'impiego delle biomasse nei paesi industrializzati sono notevolmente migliorate, grazie al diffondersi dell'idea di coltivare specie vegetali per ricavarne energia. Nell'Unione Europea, la svolta è legata all'abbandono della politica agricola seguita fino alla fine degli anni ottanta, che prevedeva la remunerazione degli agricoltori anche per prodotti alimentari non venduti sul mercato. Nonostante le quote di produzione, ciò aveva portato ad accumuli incontrollati di eccedenze ai quali si è deciso di porre rimedio incentivando, dapprima, la semplice messa a riposo dei terreni (*set-aside*) e, successivamente, lasciando agli agricoltori, sia pure con crescenti limitazioni, la possibilità di continuare a ricevere sussidi anche nel caso di attivazione di colture non alimentari. In questo modo, le colture energetiche sono diventate attraenti da un punto di vista microeconomico, mentre l'Unione Europea ha perseguito importanti obiettivi "macro" di tipo energetico, ambientale e sociale.

L'Italia è al di sotto della media europea e copre solo il 2% del fabbisogno energetico con l'utilizzo delle biomasse, nonostante l'elevato potenziale di cui dispone, ovvero 66 milioni di tonnellate di sostanza secca all'anno, equivalenti a 27 Mtep (mega tonnellate di petrolio equivalente). L'interesse dell'Italia verso lo sfruttamento delle biomasse è giustificato dal fatto che ha una produzione energetica fortemente deficitaria, in quanto importa oltre l'80% del suo fabbisogno energetico primario, di cui circa il 15% come energia elettrica. Sono stimati terreni agricoli abbandonati pari a circa 3 milioni di ettari, con alto rischio di desertificazione e di dissesto idrogeologico, su cui si dovrebbe procedere con una intensa politica di riforestazione, così come sono necessari interventi di manutenzione e riconversione del patrimonio forestale, valutato in oltre 7 milioni di ettari tra alto-fusto e ceduo. Scelte mirate al corretto sfruttamento di queste risorse potrebbero risolvere alcuni dei problemi

energetici dell'Italia. Inoltre la presenza di sottoprodotti e residui agricoli, agro-industriali e forestali, è stimata in circa 24 milioni di tonnellate di sostanza secca per anno, che potrebbero essere smaltiti in maniera ecologicamente corretta e convertiti in energia.



## 2. LA BIOMASSA

---

### 2.1 Introduzione

La biomassa, comprendendo tutta la materia organica, vegetale o animale è la fonte energetica più utilizzata nella storia, a cominciare dal cibo per il nostro sostentamento fino al legno e all'olio, utilizzati per scaldare, illuminare e forgiare i metalli.

È stato l'eccessivo sfruttamento della biomassa tra le più preziose, il legno, nell'Inghilterra del XVII secolo ad aprire la strada a biomasse fossilizzate nel sottosuolo "sporche e difficili da estrarre". Da allora lo sfruttamento delle fonti fossili di varia natura è stato un continuo incremento, anche se ogni qual volta ci risiano state penurie temporanee di combustibili fossili si è tornati alle biomasse come alternativa. Un esempio è il periodo prebellico italiano degli anni '30-'40 quando la scarsità di carbone di produzione tedesca portò a soluzioni ingegnose per l'uso delle biomasse applicato alle tecnologie più moderne. Un esempio emblematico è quello delle "corriere e camion a legna", dotate di gasogeni a legna, che producevano il gas necessario ad alimentare i motori a scoppio degli automezzi al posto della benzina.

I primi esperimenti di questa tecnologia, detta pirolisi, erano stati condotti nel XIX secolo in conseguenza della diffusione delle lampade a gas, riuscendo a produrre un gas di sintesi, detto appunto syngas, sia dal carbone che dalle biomasse. L'impulso fornito dalla scarsità di combustibili liquidi durante la seconda guerra mondiale spostò la ricerca verso soluzioni alternative quali la gassificazione appunto, che a differenza della pirolisi vera e propria avviene in presenza di ossigeno.

Da allora fino all'epoca attuale questa tecnologia è rimasta in sordina, messa in secondo piano dal petrolio e derivati.

Il sistema più semplice per produrre energia elettrica da biomasse consiste nell'impiego di queste come alimentazione per le caldaie di impianti funzionanti con ciclo a vapore, come le tradizionali centrali termoelettriche.

La gassificazione è un sistema alternativo, più raffinato e razionale per sfruttare l'energia chimica delle biomasse.

I gassificatori sfruttano la dissociazione molecolare, definita pirolisi, usata per convertire direttamente i materiali organici in gas, appunto, mediante riscaldamento in presenza di ridotte quantità di ossigeno: essi sono completamente distrutti scindendone le molecole, generalmente lunghe catene carboniose, in molecole più semplici di monossido di carbonio, idrogeno e metano, che formano un “gas di sintesi” (syngas). A differenza dei pirolizzatori, i quali attuano la pirolisi in senso stretto, ovvero in totale assenza di ossigeno, i gassificatori operando invece in presenza di piccole quantità di tale elemento producono anche una ossidazione parziale. I gassificatori possono essere considerati come una tecnologia intermedia tra l’incenerimento e la pirolisi propriamente detta.

Per le biomasse, l’energia imprigionata attraverso la fotosintesi clorofilliana in tali sostanze organiche può così essere liberata o bruciando il gas di sintesi (syngas) in una caldaia per sfruttarne il calore o alimentare una turbina a vapore, o usandolo come combustibile per i motori a combustione interna, o da usare poi in pile a combustibile per produrre elettricità.

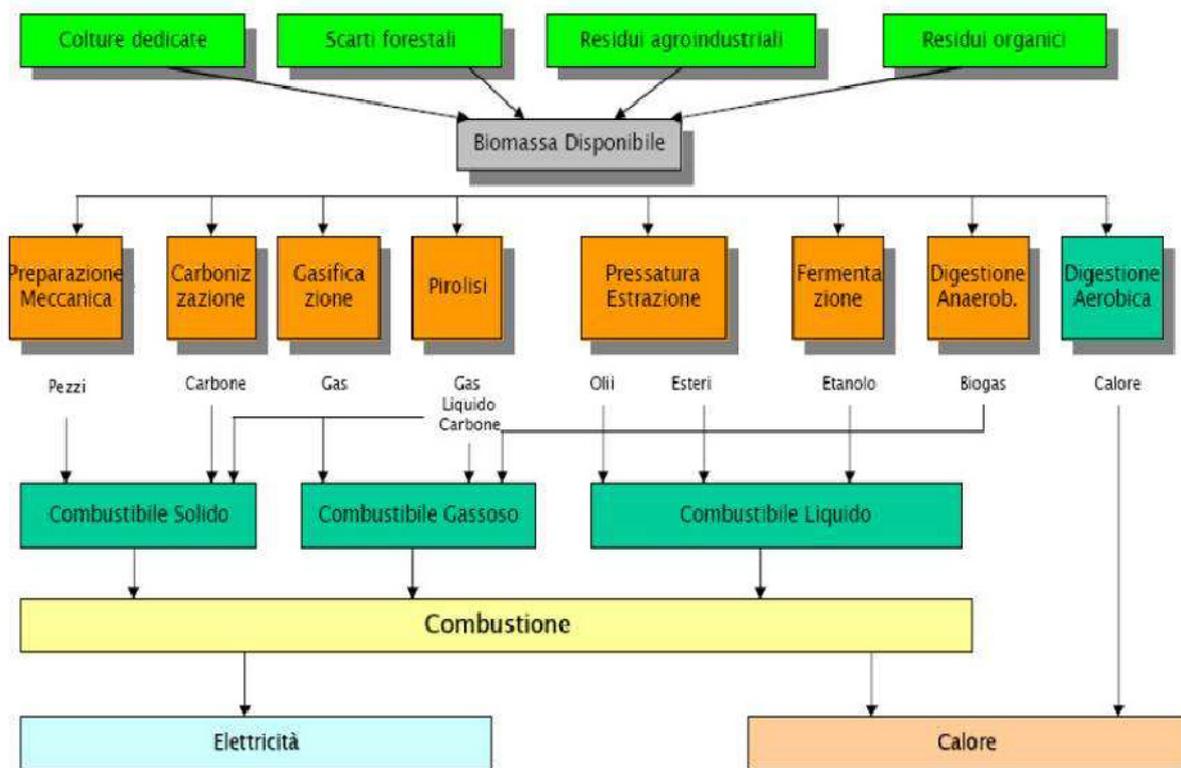


Figura 2.0.1 Schema che rappresenta i vari tipi di biomassa

## 2.1.1 Perché scegliere impianti a biomassa

Nell'ambito delle politiche di prevenzione ambientale ed abbattimento delle emissioni di gas serra adottate dalla comunità internazionale, confermate con l'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, l'impiego energetico delle fonti rinnovabili riveste un ruolo determinante.

Fra le fonti rinnovabili le biomasse rivestono un ruolo di primo piano ed attualmente soddisfano il 15% degli usi energetici primari nel mondo, con oltre un miliardo di tep/anno, in particolare:

- i paesi in via di sviluppo ricavano mediamente dalle biomasse il 38% della propria energia;
- nei paesi industrializzati le biomasse contribuiscono appena per il 3% agli usi energetici primari.

Distribuzione % regionale della produzione da biomasse nel 2008

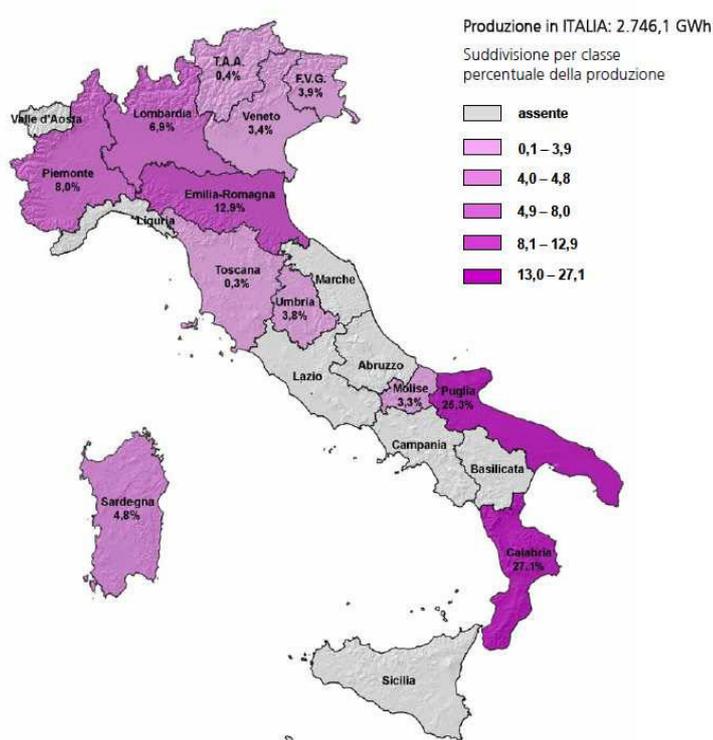
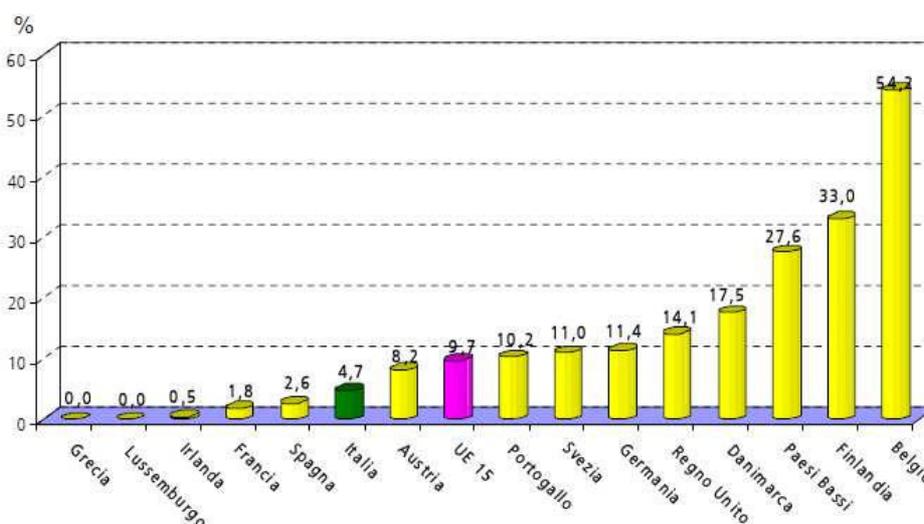


Figura 2.0.2 Distribuzione % regionale della produzione da biomasse

Questi dati devono far riflettere, considerando anche che l'Italia, con un 2% del proprio fabbisogno coperto dalle biomasse, è al di sotto della media europea, pur disponendo di importanti risorse agricole e forestali.

Ulteriore stimolo all'utilizzo delle biomasse è certamente dato dalle nuove politiche miranti alla raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani che mette a disposizione una grande quantità di biomassa costituita dalla frazione organica degli stessi.



**Figura 2.0.3** rapporto tra l'energia prodotta da biomasse rispetto al totale dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

In un paese ricco di foreste e di terreni agricoli, come appunto l'Italia, la biomassa di origine vegetale è una grande risorsa energetica rinnovabile, in grado di diminuire la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili e nel contempo ridurre la produzione di CO<sub>2</sub>.

Lo sfruttamento a fini energetici delle biomasse vegetali, e soprattutto di quelle legnose, avviene con un bilancio nullo rispetto alla anidride carbonica, durante la combustione viene infatti rilasciata la stessa quantità di CO<sub>2</sub> fissata dalle piante durante la crescita.

La produzione di energia da biomasse in impianti capaci di produrre contemporaneamente energia elettrica ed energia termica consente di ottimizzare il rendimento termodinamico del processo di trasformazione energetica e di offrire al territorio servizi aggiuntivi (teleriscaldamento e vapore/calore per usi industriali).

Il mix elettrico/termico può essere costantemente adeguato all'effettivo fabbisogno delle utenze civili ed industriali; inoltre per loro natura i moderni impianti a biomasse sono

intrinsecamente a basso impatto ambientale con emissioni (liquide, solide e gassose) estremamente contenute ed in accordo con le più stringenti normative.

Altro dato importante è che gli impianti a biomasse sono ufficialmente riconosciuti dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN) come Impianti Alimentati a Fonte Rinnovabile (IAFR), con conseguenti vantaggi:

- L'energia elettrica prodotta ha priorità di dispacciamento con impegno all'acquisto da parte del GRTN;
- La produzione di energia elettrica è incentivata attraverso il meccanismo dei Certificati Verdi.

### **2.1.2 Integrazione con il territorio**

La sostenibilità della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, ed in particolare quella da biomasse, trova concretezza e terreno di sviluppo nella interazione con le istituzioni, gli enti e le comunità locali.

Il fattore di successo a livello locale è la capacità di abbinare progetti di recupero, trasformazione e valorizzazione delle biomasse con la generazione di energia e la fornitura di servizi al territorio.

Questo consentirebbe, infatti, di massimizzare le potenzialità produttive ed occupazionali del territorio, coniugando le esigenze ambientali con le politiche locali di sviluppo socio-economico:

- Promuovendo la raccolta e l'utilizzo degli scarti agricoli come combustibile;
- Attuando un decentramento energetico sostenibile su base locale, attraverso la realizzazione di un Distretto Energetico in cui vengono svolte le attività di preparazione e trasformazione delle biomasse e la produzione di energia elettrica e calore per usi civili ed industriali

Questi obiettivi possono essere raggiunti attraverso un sistema integrato che coniughi responsabilità pubbliche e private nei processi decisionali ed operativi.

### **2.1.3 L'impatto ambientale**

i principali impatti ambientali relativi a impianti di questo tipo sono da analizzare:

- le emissioni;
- le sorgenti di rumore;
- l'impatto visivo.

Per quanto riguarda le emissioni degli impianti a biomassa (gassose, liquide e solide) devono essere mantenute entro i limiti di legge e delle normative vigenti grazie all'impiego di appositi impianti tecnologici, in particolare vanno controllati:

- effluenti gassosi: con trattamento in linea fumi mediante ciclone, assorbitori, e filtri a manica;
- effluenti liquidi: con trattamento di depurazione delle acque prodotte ed accumulate nell'impianto, incluse quelle di prima pioggia;
- effluenti solidi: in questo caso le ceneri di combustione (inerti) sono utilizzabili per usi agricoli ed industriali

Le sorgenti di rumore invece devono essere schermate con strutture fonoassorbenti per soddisfare le normative di zonizzazione acustica.

Per quanto concerne l'impatto visivo, il progetto architettonico deve essere studiato in modo da integrarsi con il contesto esistente, curando in particolare la realizzazione degli edifici e delle strutture di contenimento degli elementi dell'impianto e di aree verdi piantumate rispettando le caratteristiche della flora locale.

## 2.2 Biomassa come combustibile

Le fonti energetiche rinnovabili provenienti dal settore agro-forestale oggi riscuotono grande attenzione sia da parte dell'autorità che da parte dell'opinione pubblica. Nel caso in esame, l'utilizzo della biomassa è rivolto alla gassificazione, quindi la filiera delle biomasse ligno-cellulosiche sarà l'oggetto principale della nostra trattazione.

Con il termine "biomassa" ci si riferisce ad una gran quantità di materiali di natura estremamente eterogenea. Con alcune eccezioni, si può dire che è biomassa tutto ciò che ha matrice organica.

Sono da escludere le plastiche e i materiali fossili, che, pur rientrando nella chimica del carbonio, non hanno nulla a che vedere con la caratterizzazione, che qui interessa, dei materiali organici.

La biomassa rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Questa, infatti, consente alle piante di convertire la CO<sub>2</sub> atmosferica in materia organica, attraverso il processo di fotosintesi, durante la crescita. In questo modo, vengono fissate complessivamente circa  $2 \cdot 10^{11}$  tonnellate di carbonio all'anno, con un contenuto energetico dell'ordine di  $70 \cdot 10^3$  Mtep.

La biomassa, attraverso il processo della fotosintesi, cattura la radiazione solare e la trasforma in energia chimica; essa costituisce quindi una risorsa rinnovabile ed inesauribile, se opportunamente utilizzata, per la produzione di altre forme di energia. La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili, ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi.

Delle biomasse fanno quindi parte :

- i sottoprodotti delle produzioni erbacee, arboree e delle prime lavorazioni agroindustriali;
- i sottoprodotti delle operazioni forestali, per il governo dei boschi e per la produzione di legname da opera, e delle prime lavorazioni del legno o altro (residui dei tagli dell'erba, delle foglie, etc.);
- le colture (arboree ed erbacee) destinate specificatamente alla produzione di biocarburanti e biocombustibili;
- i reflui zootecnici destinati alla produzione di biogas;

- la parte organica dei rifiuti urbani;
- i residui inutilizzabili di produzioni destinate all'alimentazione umana o animale (pule dei cereali, canna da zucchero ecc).

A causa della grande varietà delle biomasse (cui corrisponde la varietà delle caratteristiche chimico-fisiche), non esiste un'unica tecnologia per trasformare l'energia contenuta in energia utilizzabile. Nel seguito di questo capitolo, si cerca quindi di descrivere le biomasse, le loro caratteristiche e i metodi di utilizzo in un quadro generale.

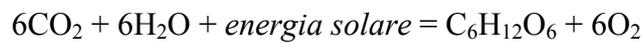
### **2.2.1 Biomasse di derivazione vegetale**

È necessario, però, sottolineare che le biomasse sono potenzialmente rinnovabili: se l'approvvigionamento di una centrale a biomasse è assicurato dal disboscamento di una foresta, non si tratta ovviamente di una risorsa rinnovabile. Se, invece, si attrezza una certa area a piantagione colturale in modo che questa fornisca ogni anno la quantità di biomassa necessaria alla centrale, allora si ha a che fare con una risorsa rinnovabile. Se si utilizzano scarti della lavorazione del legno, oppure sottoprodotti colturali, ramaglie raccolte dalla pulizia e dalla manutenzione dei boschi o reflui zootecnici, non solo si ha a che fare con una risorsa rinnovabile, ma si contribuisce anche al riutilizzo di sottoprodotti e scarti che, nella maggior parte dei casi, sarebbero conferiti in discarica o anche bruciati senza alcun controllo delle emissioni. La valutazione della sostenibilità ambientale, invece, deve tener conto non solo della provenienza della materia prima, ma anche delle implicazioni del suo utilizzo a fini energetici. Ad esempio, la rimozione di residui agricoli dovrebbe essere soppesata valutando, oltre ai benefici della bioenergia, anche le pratiche agricole (ad esempio, la combustione a bordo campo) e la rimozione di nutrienti dal suolo (che poi devono essere reintegrati con l'applicazione di fertilizzanti). Questa prima definizione di biomassa contiene implicitamente il concetto di fonte rinnovabile, in quanto esclude tutte le biomasse fossilizzate e derivati, i cui tempi di formazione, dell'ordine dei milioni di anni, non sono comparabili con i tempi di sfruttamento della risorsa, ben più rapidi considerando l'attuale tasso di consumo. Il contenuto in carbonio originario delle biomasse deriva da processi di fotosintesi vegetale, ovvero quella reazione biologica tramite la quale le piante trasformano la luce solare, l'acqua e l'anidride carbonica in carboidrati e ossigeno, secondo la formula:



Attraverso la clorofilla, ovvero il pigmento verde che ricopre le foglie, la radiazione solare incidente attiva un meccanismo di conversione chimica che coinvolge fondamentalmente la reazione fra la CO<sub>2</sub> presente nell'aria e l'acqua assorbita attraverso le radici dal terreno per formare i composti organici che poi andranno a costituire la struttura della pianta.

Considerando che il composto organico sintetizzato è il glucosio (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), la relazione sopra riportata diventa la seguente, e schematizza il meccanismo della fotosintesi:



Il meccanismo reale è chiaramente molto più complesso e comporta una serie di reazioni successive dove il glucosio viene convertito in molecole più complesse quali cellulosa, lignina, oli, proteine ecc..

Al fine del ciclo di vita, per decomposizione naturale o mediante processi di combustione, i vegetali restituiscono all'ambiente l'energia e le sostanze immagazzinate nella fase di crescita.

Tale reazione è descritta invertendo la precedente formula, dove l'energia solare diventa energia termica ceduta all'ambiente, nel caso di sfruttamento tramite combustione.

Nel complesso, quindi, l'utilizzo energetico delle biomasse consente di attivare un circuito chiuso alimentato dalla radiazione solare, e con emissioni di CO<sub>2</sub> globalmente nulle. Nella realtà, come per qualunque altra energia rinnovabile, è opportuno considerare nel bilancio finale anche la quota di energia primaria e le emissioni che competono nelle fasi di raccolta, trasporto e conversione.

Le piante e i vegetali in genere convertono l'energia solare operando con un "rendimento" alquanto modesto. Nello specifico il processo di fotosintesi si compone di una complessa catena di trasformazioni, ciascuna caratterizzata da una propria efficienza.

Partendo dall'origine del processo, non tutta la radiazione solare è efficace e sfruttabile dal meccanismo della fotosintesi, ma solamente la così detta PAR (*photosynthetic active radiation*), cioè la frazione di radiazione con lunghezze d'onda comprese tra 0,4 e 0,7 μm, che costituisce all'incirca il 50% dell'intera radiazione solare incidente al suolo.

Considerando che normalmente un 20% della radiazione viene riflessa dalle superficie delle foglie, si può concludere che solo il 40% circa della radiazione solare risulta pertanto effettivamente a disposizione del processo di fotosintesi.

Analizzando questo processo dal punto di vista termodinamico si trovano i limiti e l'efficienza intrinseca del processo di fotosintesi; valori massimi di conversione della radiazione solare sono sull'ordine del 30%, il restante 70% è costituito dalle perdite.

Considerando tutte le efficienze relative ai vari step del processo e togliendo un 40% dell'energia prodotta dalla fotosintesi che viene direttamente consumata dalla pianta stessa, si ricava il rendimento teorico limite di conversione del processo di fotosintesi con un valore pari a circa il 7%.

Il sopracitato rendimento limite teorico è relativo alle specie più efficienti, quali culture arboree di tipo annuale, mentre per le specie idonee al processo energetico esaminato in questa trattazione, quali conifere e latifoglie in genere, tale rendimento limite si attesta sul 3,5%.

Tale limite teorico è raramente raggiunto nella realtà, per cause relative alla variabilità della radiazione solare, temperature, disponibilità di acqua e nutrienti; il rendimento effettivo del processo di fotosintesi è molto inferiore e si attesta attorno a valori dello 0,15 – 0,25%. L'energia solare media annua incidente su un piano orizzontale alle nostre latitudini ammonta a circa 4-5 kWh/m<sub>2</sub> anno, corrispondenti a circa 1250-1500 tep/ha anno.

Considerando il rendimento teorico massimo di fotosintesi (7%), l'energia accumulata sotto forma di sostanza organica risulterebbe pari a 90 - 110 tep/ha anno, corrispondenti ad un accrescimento di circa 210 – 250 t/ha anno in termini di sostanza secca. Nella pratica, la produzione di sostanza secca si attesta su valori di circa 5 – 10 t/ha anno, corrispondenti pertanto a rendimenti dell'ordine di 0,15 – 0,5%.

In merito alle potenzialità di sfruttamento delle biomasse per usi energetici, una prima valutazione di carattere generale può essere effettuata tenendo conto che sulla terra viene fissato annualmente attraverso la fotosintesi l'equivalente di circa 200 miliardi di tonnellate equivalenti di carbonio, corrispondenti a circa 72 Gtep, circa 6 volte il consumo mondiale lordo di energia. Evidentemente tale valore rappresenta un potenziale puramente teorico e peraltro non raggiungibile.

Partendo da questi presupposti, possono considerarsi come principali tipologie di biomassa impiegate nel processo di gassificazione le seguenti :

- Residui forestali, legna da ardere, prodotti ligno-cellulosici vergini.

- Residui agroindustriali, agricoli, artigianali, industriali e civili (per esempio: paglie, vinacce, gusci di frutta secca, sansa di olive, lolla di riso ecc.).
- Colture energetiche dedicate (Short Rotation Forest).

La principale differenza tra l'impiego di residui di lavorazione o materiale vergine quale proveniente da colture energetiche è costituita dal loro costo.

I residui, essendo principalmente prodotti di scarto dell'industria e dell'agricoltura, comportano un costo legato al loro smaltimento, costo che può essere valorizzato se impiegati in un processo energetico come la gassificazione.

Chiaramente costi di movimentazione e trasporto sono sempre presenti. Per quanto riguarda l'impiego di materiale derivante da colture energetiche o dallo sfruttamento boschivo, a questo è sempre associato un consumo di energia primaria legato alla coltivazione, raccolta, trasporto, lavorazione, e quindi dei costi aggiuntivi che devono essere presi in considerazione. Costi facilmente calcolabili nel caso di coltivazioni energetiche, ma con molte variabili per lo sfruttamento di residui agro-forestali, dove l'elevata distribuzione spaziale della risorsa, e la bassa densità volumetrica li possono far lievitare facilmente.

### **2.2.2 Biomassa residuale e di derivazione forestale**

La biomassa forestale che si presta alla gassificazione è costituita sia dal legno vergine, cioè da piante abbattute per tale scopo, che da residui di lavorazione della filiera del legno. Ramaglia, corteccia, bordature e scarti possono essere valorizzati in tale processo.

I costi e il potenziale di questa risorsa non sono di facile stima, in quanto sono direttamente influenzati dalla delocalizzazione della risorsa, dalle difficoltà legate alla raccolta, trasporto e stoccaggio, ed inoltre all'eterogeneità della materia prima stessa.

Attualmente il cippato di legna è il combustibile principale per gli impianti di gassificazione installati, principalmente impianti di medio-piccola potenza situati nelle immediatezze dei luoghi di raccolta del legname.

### **2.2.3 Biomassa di derivazione agricola**

In questa categoria vengono considerati sia i residui derivanti dalla raccolta di prodotti agricoli, che scarti di tipo agro-industriale.

I sottoprodotti agricoli, quali paglie, stocchi di mais, ramaglie da potatura, costituiscono una notevole frazione rispetto al prodotto netto raccolto, però di norma sono altamente dispersi, implicando costi di raccolta e trasporto notevoli.

Attualmente la valorizzazione energetica di tali prodotti attraverso la gassificazione non è molto sviluppata, anche a causa delle problematiche che questo comporta: l'alto contenuto di ceneri e il basso punto di fusione di quest'ultime creano non pochi problemi nel reattore e compromettono la continuità del funzionamento (vedi tabella 3.0.1).

BIOCOMBUSTIBILE	CENERI	TEMPERATURA DI FUSIONE
	% ss	°C
Legno (abete rosso)	0,6	1426
Legno (faggio)	0,5	1340
Legno (pioppo SRF)	1,8	1335
Residui potatura (vite)	3,4	1450
Paglia frumento	5,7	839
Sorgo (cippato)	5,5	914
Miscanto	3,9	973
Granella mais	1,7	761
Pannello di girasole	4,8	1096
Sansa	8,8	1046

**Tabella 2.0.1** Caratteristiche ceneri biomasse legno-cellulosiche

Diversamente, i sottoprodotti agro-industriali come gusci di noci, lolla di riso, sanse di olive, bagasse, li ritroviamo concentrati in notevoli quantità presso le aziende produttrici, dove costituiscono un residuo che necessita di smaltimento, con i relativi costi.

In qualche caso questi vengono smaltiti attraverso una semplice combustione per produrre essenzialmente calore.

La valorizzazione in cogenerazione di questi scarti, attraverso un impianto a gassificazione, risulta essere la più fattibile, sfruttando il vantaggio dato dall'immediata disponibilità del combustibile.

## **2.2.4 Biomassa da colture energetiche**

Per colture energetiche vengono considerate tutte le sostanze vegetali coltivate esclusivamente ai fini della produzione energetica.

Il principale vantaggio di queste colture consiste nel fatto che è possibile programmare in modo dettagliato le quantità prodotte, i tempi necessari alla produzione e raccolta, ma soprattutto i costi.

Essendo delle coltivazioni, avremmo sicuramente dei costi ulteriori che andranno a sommarsi alle spese di raccolta e trasporto, realizzando così dei prezzi superiori rispetto ad altri tipi di biomassa, con la certezza però che quest'ultimi sono poco variabili nel tempo e facilmente stimabili.

Le colture energetiche più idonee al processo della gassificazione sono costituite dalle *Short Rotation Forestry* (SRF) di tipo legnoso, cioè da specie forestali perenni con alto tasso di accrescimento.

Queste specie vengono piantate con schemi e procedure idonei all'impiego di macchinari sia durante la fase di accrescimento che di raccolta.

Le specie di tipo legnoso più idonee sono: il pioppo, il salice, l'eucalipto e la robinia; permettono cicli di taglio che variano da 1 a 4-5 anni.

Sono volutamente trascurate le colture energetiche di specie erbacee perché oltre a comportare dei costi superiori nella fase di coltivazione, forniscono una biomassa con alto contenuto di ceneri che, come riportato in precedenza, causa dei problemi non indifferenti al processo di gassificazione.

## **2.3 Caratteristiche delle biomasse ligno-cellulosiche**

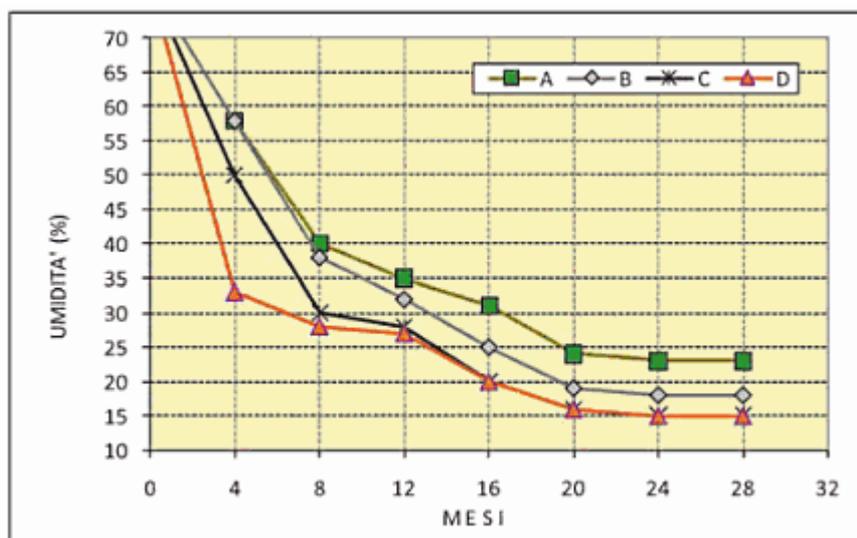
Le biomasse ligno-cellulosiche, sia residuali sia derivanti da coltivazione energetiche, come descritto in precedenza, venivano utilizzate essenzialmente per alimentare caldaie e generatori di vapore in sostituzione ai combustibili fossili convenzionali.

Ad oggi invece, l'impiego di tali biomasse in processi di gassificazione consente di ottenere una migliore flessibilità nel funzionamento e migliori efficienze.

Ai fini dell'impiego in un processo di combustione o gassificazione, le caratteristiche chimico-fisiche più importanti delle biomasse sono l'umidità e il potere calorifico, per quanto possano essere di non trascurabile importanza anche i tenori di ceneri, cloro, azoto, zolfo e il volume specifico.

L'umidità e il potere calorifico, oltre ad essere strettamente correlati tra di loro, assumono anche un ruolo determinante ai fini dell'effettiva valorizzazione energetica ed economica

delle biomasse in quanto condizionano fortemente i costi di raccolta, trasporto e movimentazione da un lato e il rendimento del processo di gassificazione dall'altro.



**Figura 2.0.4** Processo di essiccazione con diverse variabili

In figura 3.0.2 è rappresentato il processo di essiccazione naturale della legna da ardere: (A) tronchi lasciati sul piano di taglio all'aria libera per 6 mesi; (B) stoccaggio sotto tettoia dei legni dopo 3 mesi di giacenza sul piano di taglio; (C) stoccaggio sotto tettoia di ciocchi da 33cm preparati dopo 3 mesi di giacenza sul piano di taglio; (D) stoccaggio sotto tettoia di ciocchi da 33cm pezzati subito dopo il taglio in bosco.

L'umidità della biomassa esprime il suo contenuto di acqua e può essere riportata sul tal quale oppure sul secco. Se si indica con  $m_a$  la massa d'acqua e con  $m_s$  la massa di sostanza secca, il tenore di umidità  $U$  (oppure  $M$ ) sul tal quale è definito come:

$$U = \frac{m_a}{m_a + m_s}$$

ed assume valori compresi tra zero e uno. Il tenore di umidità  $U_0$  (oppure  $u$ ) sul secco invece è definito come:

$$U_0 = \frac{m_a}{m_s}$$

ed assume valori compresi tra zero e infinito.

Poiché in una biomassa il componente utile dal punto di vista energetico è costituito dalla frazione secca (l'unica caratterizzata da un potere calorifico), mentre l'acqua rappresenta di fatto un componente indesiderato, può essere utile definire il rapporto  $R_m$  fra la massa della biomassa tal quale e la massa di sostanza secca.

Tale rapporto è rappresentativo dell'incremento dei quantitativi di biomassa tal quale da raccogliere, trasportare e stoccare per unità di sostanza secca, che rappresenta di fatto la frazione utile dal punto di vista energetico.

Questa informazione risulta di fondamentale importanza in quanto i costi di raccolta, trasporto e stoccaggio delle biomasse sono una frazione considerevole dei costi totali di approvvigionamento essendo dell'ordine del 20-40 % nel caso di biomasse provenienti da coltivazioni energetiche, e praticamente il 100% nel caso di biomasse residuali.

Il rapporto  $R_m$  è così definito:

$$R_m = \frac{m_a + m_s}{m_s} = 1 + U_0 = \frac{1}{1 - U}$$

Come evidenziato dalle relazioni precedenti, in corrispondenza di una umidità del 50-55% (valore tipico alla raccolta per molte varietà legnose) il rapporto  $R_m$  è circa pari a 2, mentre per biomasse di natura erbacea con umidità alla raccolta attorno all' 80%, il rapporto  $R_m$  è pari a 5.

Secondo quanto stabilito dalle normative (si veda per esempio la norma UNI 9017 che individua le modalità per la determinazione delle caratteristiche energetiche della legna da ardere), la determinazione dell'umidità si effettua attraverso il metodo gravimetrico, pesando un campione di biomassa tal quale e introducendolo in una stufa ventilata e termostata a 103°C (+/- 2°C).

La quantità d'acqua evaporata, e quindi l'umidità sul tal quale si valuta misurando la differenza di peso iniziale  $m_I$  e quella finale  $m_F$ :

$$U = \frac{m_I - m_F}{m_I}$$

Un altro parametro fondamentale è costituito dal potere calorifico della biomassa in esame.

Il potere calorifico viene valutato a partire dalla biomassa secca mediante l'ausilio di un calorimetro, nel quale avviene la combustione di un campione di massa nota. Il calorimetro fornisce il valore dell'energia termica liberata dalla combustione attraverso la misura del calore di raffreddamento dei gas combusti fino alla temperatura di 25°C.

Ovviamente con questo procedimento viene misurato il potere calorifico superiore della biomassa espresso su base secca ( $PCS_0$ ), in quanto viene recuperato anche parte del calore latente di condensazione del vapore contenuto nei fumi.

Valori tipici del potere calorifico superiore per la maggioranza delle biomasse secche sono compresi fra 19 e 22 MJ/kg.

Ai fini pratici, la condensazione dei fumi di combustione è di norma evitata, per cui risulta più interessante definire il potere calorifico inferiore (PCI), che viene valutato sottraendo al potere calorifico superiore il calore di condensazione dell'acqua.

Per un dato valore del  $PCS_0$ , il potere calorifico inferiore sul secco si calcola a partire dal calore di condensazione dell'acqua  $r$  e dalla frazione di massa di idrogeno  $H$  nella biomassa secca:

$$PCI_0 = PCS_0 - 9 \cdot H \cdot r$$

essendo il quantitativo d'acqua prodotto pari a 9 volte il quantitativo di idrogeno presente nel combustibile.

Poiché il tenore di idrogeno nelle biomasse legnose è dell'ordine del 5-7% e il calore di condensazione è pari a circa 2,4 MJ/kg, la differenza tra il potere calorifico inferiore e quello superiore è dell'ordine di 1-1,5 MJ/kg.

Valori tipici del potere calorifico inferiore su base secca sono solitamente dell'ordine di 18-20 MJ/kg.

L'energia effettivamente utilizzabile dal punto di vista pratico, non è il potere calorifico inferiore sul secco ( $PCI_0$ ) ma il potere calorifico sul tale quale (PCI). Valore facilmente ricavabile tenendo conto che l'energia chimica relativa alla massa di sostanza tale quale (secco + acqua) è data dall'energia chimica della sostanza secca diminuita del calore di vaporizzazione dell'acqua che, come illustrato precedentemente, non viene recuperato:

$$(m_a + m_s) \cdot PCI = m_s \cdot PCI_0 - m_a \cdot r$$

ovvero:

$$PCI = (1 - U) \cdot PCI_0 - U \cdot r = PCI_0 - U \cdot (PCI_0 + r)$$

La relazione precedente mostra come il potere calorifico inferiore di una biomassa, diminuisca linearmente con l'aumento della sua umidità, fino ad annullarsi del tutto per valori di umidità dell'ordine del 88-90%.

In pratica, la combustione di biomasse con valori di umidità superiori al 65-70% non è in grado di sostenersi, e pure nel processo di gassificazione l'eccessiva umidità della biomassa provoca lo stesso effetto nella fase di pirolisi, come verrà spiegato.

L'umidità ha quindi un effetto molto rilevante nei confronti del potere calorifico.

Con riferimento ad un potere calorifico sul secco di circa 18-19 MJ/kg, con un'umidità del 10-15% (tipica del legno stagionato/essiccato) corrisponde un potere calorifico sul tale di circa 15-16 MJ/kg, mentre una umidità del 50-55% (tipica del legno fresco appena tagliato) comporta un potere calorifico inferiore di circa 7-8 MJ/kg.

A tal proposito può essere utile esprimere il rapporto  $R_H$  fra i citati valori del potere calorifico:

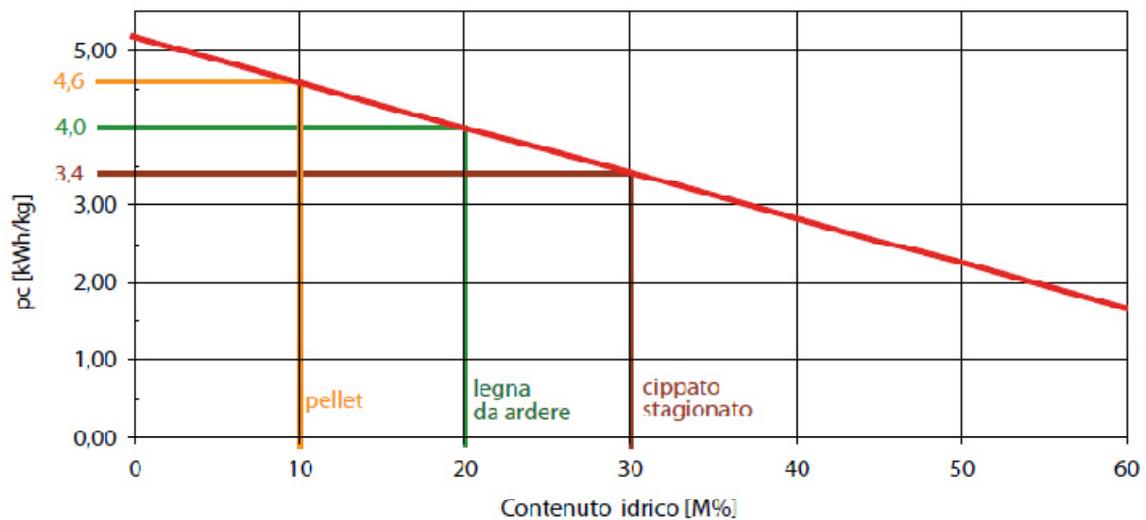
$$R_H = \frac{PCI}{PCI_0} = 1 - U \cdot \left( 1 + \frac{r}{PCI_0} \right)$$

La frazione di energia  $R_E$  che può essere effettivamente utilizzata nel processo di combustione di una biomassa umida vale pertanto:

$$R_E = \frac{(m_a + m_s) \cdot PCI}{m_s \cdot PCI_0} = R_M \cdot R_H = \frac{1}{1 - U} \cdot \left( 1 - U \cdot \left( 1 + \frac{r}{PCI_0} \right) \right)$$

Il rapporto energetico  $R_E$  diminuisce al crescere dell'umidità, ma diminuisce di meno di quanto non indichi la diminuzione del potere calorifico (diminuzione espressa dal rapporto  $R_H$ ) in relazione all'aumento della massa (ovvero del rapporto  $R_M$ ).

Il complemento a uno del rapporto  $R_E$  rappresenta la frazione energia  $R_P$  effettivamente persa nel processo di combustione, nel caso della gassificazione, questa perdita è presente in corrispondenza della pirolisi del combustibile.



**Figura 2.0.5** Andamento PCI-umidità

Ai fini della gassificazione delle biomasse assume notevole importanza anche il tenore di ceneri, ovvero la frazione sul tal quale di materiale inorganico (sostanza non combustibile) che si ritrova come residuo alla fine del processo di gassificazione o in qualsiasi combustione. Elevati valori del tenore di ceneri determinano una riduzione del potere calorifico, un aumento dei costi di smaltimento e maggiori problemi legati alla possibile formazione di incrostazioni, intasamenti, erosioni all'interno del reattore.

Il tenore di ceneri si misura subito dopo la misura dell'umidità, ovvero a partire dalla sostanza secca.

Il campione di biomassa secca viene macinato finemente (circa 1 mm) e introdotto in un forno termostato a 750°C al fine di ottenerne la completa combustione. Alla fine del processo, la massa residua rappresenta il contenuto di ceneri del campione analizzato.

Il contenuto di ceneri su base secca è solitamente compreso fra lo 0,5% e l'1,5%, anche se, come nel caso delle paglie, può arrivare a valori del 10-15%.

Risulta inoltre molto importante valutare la temperatura di fusione delle ceneri, che di solito si attesta su valori dell'ordine di 1200-1250°C, se vi sono ceneri con basso punto di fusione può presentarsi il fenomeno dello *slag*: dove le ceneri fuse, quando giungono in zone più fredde del reattore danno luogo a depositi solidi e incrostazioni.

## **2.4 Lavorazioni preliminari e preparazione del combustibile**

Per le biomasse utilizzate come combustibile nel processo di gassificazione, quindi principalmente biomasse ligno-cellulosiche di derivazione forestale, le componenti del costo, come accennato in precedenza, sono essenzialmente dovute alla fase di raccolta, trasporto e preparazione.

La fase di raccolta consiste nell'abbattimento delle piante destinate ad essere utilizzate, e la loro estrazione fino a delle strade carrozzabili dove possono essere accumulate e preparate per il trasporto.

Chiaramente in questa fase la localizzazione del cantiere ha notevole influenza sulle tempistiche e sulla fluidità del lavoro con costi direttamente proporzionali alla distanza dall'azienda. Questa fase necessita chiaramente di personale specializzato e di attrezzature e macchinari dedicati.

Nel caso di colture energetiche i costi di raccolta spaziano entro una forchetta ristretta in quanto le condizioni di lavoro sono di norma favorevoli e idonee alla completa meccanizzazione del processo.

Altro step è la cippatura della biomassa, cioè la riduzione del materiale legnoso in piccoli frammenti di qualche centimetro.

Attraverso dei macchinari detti cippatrici, le piante, o porzioni di esse vengono sminuzzate fino a dimensioni idonee all'utilizzo, queste dimensioni sono standardizzate.

## **2.5 La qualità del cippato**

Ci sono alcuni parametri chiave da tenere in considerazione che descrivono la qualità del combustibile:

- il contenuto di fibra;
- il tipo di materia prima;
- la pezzatura del cippato;
- il contenuto di umidità.

### **2.5.1 Il contenuto di fibra**

Indica la quantità di legno effettivamente presente nel cippato e può dare buone informazioni circa il suo potere calorifico, il contenuto di ceneri e la possibilità di conservazione.

Tuttavia un'elevata porzione di fibra non corrisponde necessariamente a un più alto potere calorifico: infatti corteccia e foglie possono avere un potere calorifico più alto della porzione legnosa, ma contengono anche un maggior contenuto di ceneri e nutrienti, che fanno accrescere il degrado del cippato posto in deposito.

In generale, la percentuale di fibra è più alta nel cippato prodotto da tronchi sramati (circa il 90 %) e minore in quello ottenuto dalle ramaglie (tra il 70 % e l'80 %).

### **2.5.2 Materia prima**

Il cippato prodotto a partire dal tonname stagionato è generalmente il migliore, quello prodotto da ramaglie e cimali può essere adeguato, anche se la forte percentuale di corteccia determina una maggiore formazione di ceneri.

I residui di segheria come sciaveri e refili consentono di produrre cippato di buona qualità.

In generale è opportuno puntare su materie prime vergini, che limitano il rischio di contaminazione e favoriscono lo sviluppo di un mercato locale per i sottoprodotti delle attività di gestione del territorio.

Il cippato ottenuto può essere di tre tipologie (in base a quali parti dell'albero vengono utilizzate):

- cippato bianco, che deriva dalla sminuzzatura di solo legno, ovvero di fusti o tronchetti preventivamente scortecciati;
- cippato marrone o con corteccia, che presenta colore più scuro del precedente e, a parità di altre condizioni, una massa volumica leggermente superiore poiché la corteccia si frantuma in particelle di dimensioni più piccole e riempie parte degli interstizi fra i cips, dando origine a un cumulo più compatto; è il tipo di cippato più frequente, sia nella produzione forestale sia in quella industriale;
- cippato verde, contenente anche fogliame (soprattutto aghi), in quanto ottenuto dalla riduzione in cips di piante intere o di porzioni della chioma.

La presenza di aghi nel cippato comporta una maggiore umidità e rende il materiale più soggetto a fenomeni indesiderati di compattamento all'interno dei silos.

Se il cippato è ottenuto da piante intere, la quota parte di aghi è comunque piuttosto ridotta: a titolo di esempio, 1 m<sup>3</sup> di cippato ottenuto dalla sminuzzatura di piante intere di pino silvestre con diametro a petto d'uomo di 10–15 cm è composto per il 79% da legno, il 13% da corteccia, il 4% da aghi e il restante 4% da impurità. La presenza di aghi o foglie verdi è indice di materiale prodotto in foresta e ottenuto da piante sminuzzate subito dopo l'abbattimento, e quindi assai ricco di umidità indipendentemente dalla presenza o meno di fogliame.

### **2.5.3 Pezzatura del cippato**

Possono essere espresse come lunghezza media dei cips, oppure come loro distribuzione granulometrica in (due o più) classi dimensionali.

Riferendosi alla lunghezza media, per esempio, si parla di cippato fine quando i cips hanno dimensioni di 10 x 20 x 20 mm e di cippato grossolano per particelle di 15 x 50 x 70 mm.

Le dimensioni delle particelle influiscono sulla densità del materiale, sul tempo di essiccazione e sono determinate dal tipo di cippatrice impiegata e dalla regolazione del dispositivo di taglio (velocità di rotazione dell'organo di taglio, velocità di avanzamento del pezzo di legno, regolazione della sporgenza e affilatura dei coltelli).

L'omogeneità della pezzatura del cippato è fondamentale per un buon funzionamento dei gassificatori, specialmente per quelli di piccole dimensioni.

Materiale di dimensioni variabili può portare a intasamenti nel sistema di alimentazione, che rappresenta la causa più comune di interruzione dell'attività dei piccoli impianti.

Questi richiedono generalmente cippato con dimensioni non superiori ai 50 mm, e con una percentuale di particelle sottomisura (più piccole di 2 mm) al di sotto del 5%. La pezzatura ideale è compresa tra gli 8 e i 30 mm.

Le scaglie allungate sono particolarmente problematiche, queste vengono prodotte dalle cippatrici quando lavorano l'ultimo mozzicone di tronco: da qui deriva l'interesse a cippare tronchi piuttosto lunghi, per ridurre l'incidenza dei mozziconi rispetto alla massa complessiva.

La pezzatura più omogenea si ottiene dalla cippatura di tronchi sramati con la maggior parte delle particelle che ricade nelle classi dimensionali centrali, con predominanza del cippato di

piccole dimensioni: nel caso della cippatura di ramaglia secca aumenta l'incidenza delle particelle più grandi per effetto della fragilità del legno secco che si può rompere ancor prima di essere tagliato, mentre nel caso della cippatura di ramaglia fresca si produce una grande quantità di polvere, a causa dell'alta percentuale di aghi.

Un altro fattore significativo che influenza la pezzatura è la scelta della cippatrice: le cippatrici a tamburo producono una maggior percentuale di cippato di medie dimensioni rispetto alle cippatrici a disco.

La pezzatura viene indicata con dei riferimenti tipo Dn°; dove il valore numerico è indicativo delle dimensioni tipo:

- Cippato piccolo (D 30)  
Lunghezza nominale  $\leq 30$  mm  
Sezione  $< 3$  cm<sup>2</sup>  
Lunghezza massima 8,5 cm
- Cippato intermedio (D 50 )  
Lunghezza nominale  $\leq 50$  mm  
Sezione  $< 5$  cm<sup>2</sup>  
Lunghezza massima 12 cm
  
- Cippato grande (G 100 grob)  
Lunghezza nominale  $\leq 100$  mm  
Sezione  $< 10$  cm<sup>2</sup>  
Lunghezza massima 25 cm

Per ottenere una selezione del cippato in base alla pezzatura, e per eliminare tutta la polvere presente, è necessario disporre di un sistema di vagliatura, ossia un macchinario entro il quale il cippato scorre e viene suddiviso in base alle dimensioni attraverso delle apposite griglie forate, con fori di dimensione standard.

Per realizzare un'efficace eliminazione della polvere e della segatura dal materiale cippato è opportuno realizzare la fase di vagliatura dopo la fase di essiccazione, cioè quando il cippato ha umidità compresa tra il 10 e 15%, altrimenti si ottiene una depolverizzazione non ottimale.

## 2.5.4 Contenuto di umidità

Il potere calorifico del combustibile, come illustrato in precedenza, viene condizionato dal contenuto d'umidità: tanto più è alto il contenuto idrico, tanta più energia viene consumata per far evaporare l'acqua durante la fase di pirolisi.

Il tenore di umidità del legno al momento del taglio può variare da un minimo del 40% ad un massimo del 60% a seconda di numerosi fattori che di solito includono la specie, la stagione di taglio e la parte della pianta: le conifere tendono ad essere più umide delle latifoglie, ad eccezione del pioppo e delle salicacee, mentre il frassino ha un tenore di umidità basso (35% al momento del taglio).

L'andamento stagionale può avere un forte impatto, soprattutto sulle latifoglie, ad esempio l'ontano tagliato in maggio ha un tenore del 45% e quello tagliato in settembre del 40%; le diverse parti della pianta hanno un differente tenore idrico, che generalmente diminuisce dalla base della pianta verso il cimale.

CLASSE DI QUALITA'	CONTENUTO ACQUA
W20 "secco"	< 20 %
W30 "stabile all'ammasso"	20 - 29,9 %
W35 "parzialmente stabile all'ammasso"	30 - 34,9 %
W40 "umido"	35 - 39,9 %
W50 "fresco"	40 - 49,9 %

Tabella 2.0.2 Qualità del cippato in funzione dell'umidità

## 2.5.5 Classificazione e standardizzazione

Il combustibile legnoso può essere suddiviso in diverse classi a seconda del contenuto di umidità e della pezzatura; in particolare è stato proposto uno standard pratico basato su tre categorie definite dalle classi di pezzatura:

- cippato di qualità superiore (2-25 mm): cippato di legno selezionato molto attentamente senza la presenza di pezzi sovra misura, per la sua produzione sono necessarie attrezzature di cippatura e vagliatura specializzate;

- cippato di buona qualità (2-50 mm): la categoria più utilizzata a livello commerciale, adatta per la maggior parte delle caldaie di dimensioni medio-piccole, questo combustibile si ottiene con cippatrici selezionate e/o con una semplice vagliatura;
- cippato di classe grossolana (2-100 mm): utilizzato nel settore dell'autoapprovvigionamento e in alcuni settori commerciali. Caratteristica di questo combustibile è il prezzo molto basso che compensa eventuali interventi di manutenzione.

Un dato lotto di cippato è caratterizzato da una sequenza di lettere e numeri che indicano le sue origini, la pezzatura, il contenuto di umidità, tutti misurati secondo metodi descritti nello standard stesso.

### **2.5.6 Conservazione del cippato**

Il cippato tende a deteriorarsi se è umido in quanto i batteri e i funghi che si sviluppano si cibano di legno: nelle piante vive la corteccia si comporta da strato protettivo e ne impedisce l'entrata, nel cippato la superficie di legno esposta agli agenti patogeni aumenta e di conseguenza si moltiplicano le "infezioni microbiche".

L'attività dei microrganismi comincia entro poche ore dopo la cippatura e può continuare per settimane, finché il calore sviluppato dalla respirazione microbica diventa così intenso da inibire un ulteriore sviluppo dei microrganismi.

L'attività microbica nel cumulo di cippato ha le seguenti conseguenze:

- genera calore che essicca il materiale (l'umidità può essere però nuovamente riacquistata per effetto degli agenti meteorologici come pioggia, neve, nebbia) e un eccessivo riscaldamento può portare al fenomeno dell'autocombustione;
- riduce la quantità di sostanza secca e nei climi temperati questa perdita oscilla tra il 2 e il 4% della massa per mese. Il legno viene convertito in acqua, anidride carbonica ed energia (calore) in conseguenza della respirazione dei microrganismi.

### **2.5.7 Modalità di stoccaggio**

La maggior parte dei metodi di stoccaggio del cippato ha come scopo la riduzione del contenuto di umidità. In generale, si cerca di ridurlo prima della cippatura, stagionando il legname ancora intero.

Quando si vuole accelerare l'essiccazione, è preferibile lasciare a terra le piante abbattute in quanto le foglie continuano, per effetto della traspirazione, a espellere acqua: sono infatti le radici che permettono alla pianta l'approvvigionamento idrico grazie al contatto con la riserva idrica del terreno, invece allestire in tronchi legname e alberi significa ridurre l'interfaccia tra l'aria e il legno alle sole superfici di taglio (testate di tronchi e mozziconi di ramo) e l'essiccazione avviene molto lentamente.

Abbattendo le piante a inizio estate e lasciandole intere per un periodo di 4-8 settimane, le parti superiori e i cimali possono raggiungere un tenore idrico del 35-40% contro l'iniziale 50% al momento del taglio mentre i tronchi possono perdere solo alcuni punti percentuali della loro umidità iniziale, anche prolungando lo stoccaggio per l'intera estate.

Questo è comunque preferibile alla cippatura immediata e allo stoccaggio come cippato, dato che i tronchi offrono una superficie ridotta all'ingresso dei microrganismi e per questo il rischio di deterioramento è molto ridotto.

Il legname intero andrebbe stoccato in luoghi ventilati (la ventilazione ha un'efficacia più elevata della radiazione solare) e andrebbe evitato il contatto diretto con il terreno e l'erba formando la catasta su una superficie in cemento o ghiaia o sollevandola da terra con l'ausilio di tronchi.

Il legname cippato fresco dovrebbe essere utilizzato rapidamente entro poche settimane e, se questo non fosse possibile, la strategia migliore consiste nel proteggerlo dalle precipitazioni evitando l'assorbimento di umidità e la conseguente attivazione dei microrganismi limitando la perdita di sostanza secca ad un solo ciclo di riscaldamento (dopo che l'autoriscaldamento ha asciugato il cumulo in modo da rallentare la decomposizione).

I cumuli di cippato possono essere coperti con teli impermeabili (consentono solo il flusso dell'umidità dal cumulo verso l'atmosfera permettendo l'asciugamento del combustibile) immagazzinati sotto tettoie oppure compattati con un bulldozer avvolgendoli con pellicole plastiche ad uso agricolo.



## 3. I GASSIFICATORI

---

### 3.1 Il processo di gassificazione

Il processo di gassificazione consiste nella conversione di un materiale carbonioso solido, come la biomassa, in un vettore energetico gassoso tramite una parziale ossidazione ad alta temperatura.

Il gas prodotto da tale processo è principalmente composto da:

- monossido di carbonio (CO);
- anidride carbonica (CO<sub>2</sub>);
- idrogeno (H<sub>2</sub>);
- metano (CH<sub>4</sub>);
- acqua (H<sub>2</sub>O);
- azoto (N);
- altri idrocarburi quali l'etilene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) e l'etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>);
- altre sostanze quali cenere, particelle di carbone, tar e oli.

L'agente gassificante utilizzato può essere:

- aria;
- ossigeno;
- vapore acqueo;
- una miscela di questi.

Il gas prodotto si presta ad essere impiegato come un comune combustibile gassoso, quindi di facile convoglio e trasporto, o impiegato in altri processi industriali.

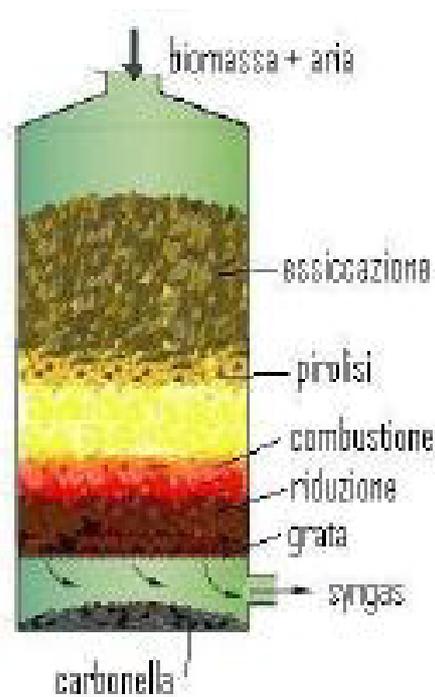
Il processo di gassificazione avviene all'interno di un reattore e può essere diviso principalmente in due stadi:

- Un primo stadio di pirolisi, dove per mezzo di una serie di complesse reazioni a temperatura inferiore a 600°C vengono rilasciate le componenti volatili del combustibile.

I vapori volatili rilasciati contengono anche idrocarburi gassosi, idrogeno, monossido di carbonio, anidride carbonica, tar e vapore acqueo.

Quel che resta dal processo di pirolisi sono principalmente il char (un agglomerato di natura complessa costituito da carbonio, ceneri, composti zolfo e idrocarburi volatili) e la cenere.

- Il secondo stadio del processo è costituito dalla gassificazione dei prodotti della pirolisi, i quali reagendo con l'agente gassificante portano alla decomposizione dei gas e vapori che li compongono, e alla conversione del carbone solido contenuto in essi. Quest'ultima fase è la reazione più importante dello stadio di gassificazione; essendo la fase più lenta, condiziona tutta la cinetica dell'intero processo e conseguentemente anche le prestazioni del reattore.



**Figura 3.0.1** Schema fasi di gassificazione

### 3.1.1 Pirolisi

La pirolisi è il primo passo di ogni processo di gassificazione e consiste nella decomposizione termochimica della biomassa ottenuta mediante l'applicazione di calore, a temperature comprese tra 400 e 800 °C, in completa assenza di un agente ossidante, oppure con una ridottissima quantità di ossigeno; questo causa una devolatilizzazione della biomassa con

generazione di una complessa miscela di gas (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O), vapori condensabili e carbone vegetale.

La dimensione della particelle di biomassa, la loro velocità di riscaldamento e la temperatura a cui vengono sottoposte determinano la velocità del processo di pirolisi e conseguentemente la composizione dei prodotti finali.

Possiamo avere reazioni di:

- pirolisi veloce.
- pirolisi lenta.

La pirolisi lenta è caratterizzata da una modesta velocità di riscaldamento, prevalente nei gassificatori updraft, ma anche nei gassificatori downdraft in presenza di materiale dalla pezzatura grossolana, essa massimizza la produzione di char, anche se è sempre presente il tar sottoforma di vapori.

Con velocità di riscaldamento del materiale sufficientemente elevata, si rientra nel campo della pirolisi veloce, con produzione di un'alta quantità di olefine (idrocarburi) ad alta temperatura, sopra i 700°C, o liquidi nel caso di temperature inferiori, sotto i 600°C, e una piccola frazione di char.

Come accennato precedentemente, lo scambio termico che si realizza e la dimensione delle particelle determinano le caratteristiche del meccanismo di pirolisi, di per sé complesso ed eterogeneo.

Semplificando, si può assumere di avere: il processo regolato dalla reazione chimica, dove la temperatura delle particelle di biomassa è omogenea e la velocità di reazione limite è quella delle reazioni chimiche in gioco; il processo è regolato dallo scambio termico, la temperatura della particella eterogenea, e la velocità della reazione è limitata dallo scambio termico interno alle particelle stesse.

Con particelle di piccole dimensioni lo scambio termico non ha particolari limitazioni, si ha quindi una reazione omogenea, con velocità proporzionale al peso (o densità) della biomassa solida.

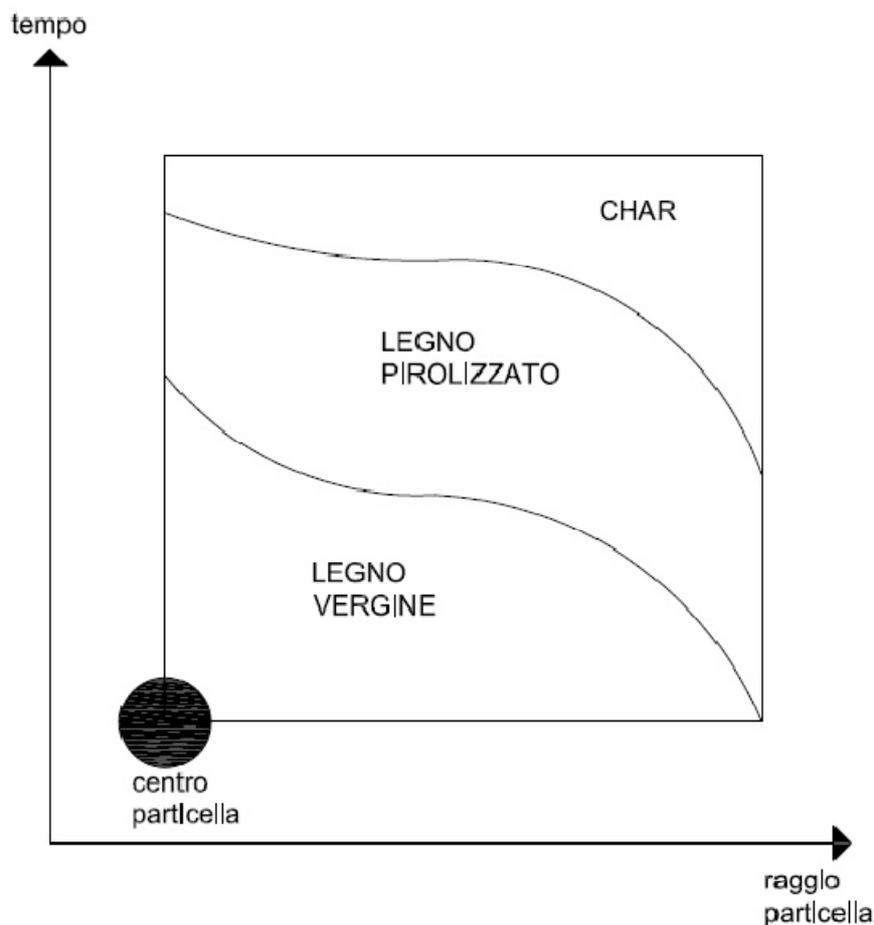
Con particelle di biomassa relativamente grandi la pirolisi può realizzarsi solo in un sottile strato che procede verso l'interno, individuato da un modello a "nucleo restringente".

Le particelle hanno una forma molto eterogenea, per cui la reazione di pirolisi risulta di fatto una commistione dei due modelli descritti in precedenza.

Considerando una biomassa di tipo legnoso, costituita da: lignina (20-25%), cellulosa (40-50%) e emicellulosa (25-40%), durante la pirolisi si decompone prima l'emicellulosa tra 200-300°C, poi la cellulosa tra 250-300°C e infine la lignina tra 300-500°C.

Emerge subito che al variare della composizione, densità, permeabilità termica della biomassa, varia molto anche l'andamento della reazione di pirolisi e l'interazione tra processi chimici e fisici che la costituiscono.

La decomposizione della particella avviene per mezzo di reazioni esotermiche e endotermiche, le quali influenzano direttamente il flusso termico verso l'interno alla biomassa che avviene principalmente per conduzione. Anche il deflusso verso l'esterno dei gas pirolitici e lo scambio convettivo associato è un'ulteriore resistenza alla conduzione termica verso l'interno. Semplificando, durante la reazione possiamo dividere la particella in tre strati virtuali concentrici e rappresentarli in funzione dello spessore e del tempo di durata della stessa:



**Figura 3.0.2** Progressione della pirolisi in funzione del tempo e delle dimensioni

La distinzione tra particelle grandi o piccole è senza dubbio conseguente all'andamento della reazione, in particolare alla sua velocità e alla diffusività termica.

Per il legno si trova che le particelle avente raggio superiore a 3 cm vengono considerate grandi, mentre per raggi inferiori ai 0,05 cm vengono considerate piccole.

Riassumendo: particelle piccole rimangono uniformemente alla stessa temperatura a seguito del riscaldamento esterno, e la pirolisi procede uniformemente; i gas pirolitici fuoriescono facilmente, contengono una notevole quantità di molecole pesanti e si produce meno char.

In presenza di particelle più grandi si forma uno strato pirolitico che procede verso l'interno, i prodotti che si formano permangono per tempo superiore nella matrice solida per cui avremo un gas composto da molecole leggere e la generazione di un char secondario.

L'altro importante fattore che influenza il meccanismo di pirolisi è la velocità di riscaldamento; un riscaldamento veloce, sull'ordine di  $10^4$  °C/min, riduce i tempi di permanenza alle basse temperature, limitando così le reazioni auto-catalitiche e la decomposizione secondaria delle parti volatili: diminuisce in questo modo la produzione di gas e di char in favore di una grande quantità di prodotti in fase liquida o sottoforma di vapori quali idrocarburi pesanti(tar).

Con velocità di riscaldamento minori sull'ordine di 100°C/min, migliorano le reazioni secondarie, con una maggiore produzione di gas e char. Le reazioni secondarie sono favorite anche da un tempo di permanenza dei prodotti maggiore, contribuendo come specificato prima ad una maggiore produzione di gas e char.

PIROLISI	CONDIZIONI OPERATIVE	LIQUIDO	CHAR	GAS
Veloce	Temperatura attorno ai 500°C, tempo di permanenza circa 1s	75%	12%	13%
Intermedia	Temperatura attorno ai 500°C, tempo di permanenza circa 10-20s	50%	20%	30%
Lenta	Temperatura attorno ai 400°C, tempo di permanenza molto lungo	30%	35%	35%

**Tabella 3.0.1** Parametri riguardanti la velocità della pirolisi

I prodotti della pirolisi hanno una composizione che può variare di molto, come illustrato, tuttavia non è necessario determinarla in modo preciso ed esaustivo in quanto è la successiva reazione di gassificazione che porta alla formazione del syngas e la loro influenza sul prodotto finale è marginale.

I prodotti sottoforma di liquidi (tar) o vapori condensabili invece possono creare problemi nella fase successiva e compromettere il gas di sintesi finale.

### 3.1.2 Gassificazione

Il processo di gassificazione è la fase in cui il potere calorifico del combustibile solido viene trasferito ad un vettore energetico gassoso.

Il punto di partenza sono i prodotti pirolitici, che reagendo con l'agente gassificante danno luogo al syngas quale prodotto finale.

Tutto il processo è endotermico, dunque il calore necessario viene fornito dall'esterno o generato attraverso una parziale combustione del char e dei prodotti della pirolisi.

Per l'agente gassificante si possono impiegare diverse soluzioni, aria ambiente, ossigeno o vapore acqueo, la cosa fondamentale è che contenga ossigeno libero necessario per:

- la fase di parziale ossidazione, che fornisce calore per l'essiccazione, la pirolisi e la gassificazione.
- la fase di gassificazione dove reagiscono i prodotti pirolitici

	ARIA	OSSIGENO	VAPORE
CO	12-15	30-37	32-41
CO <sub>2</sub>	14-17	25-29	17-19
H <sub>2</sub>	9-10	30-34	24-26
CH <sub>4</sub>	2-4	4-6	12.4
N <sub>2</sub>	56-59	2-5	2.5
Potere cal. Inferiore (MJ/Nm <sup>3</sup> )	3.8-4.6	10	12-13

**Tabella 3.0.2** Composizione percentuale del syngas a seconda dell'agente gassificante

Oltre a questi composti, il syngas contiene altri contaminanti; la loro concentrazione deve essere ridotta in quanto potrebbero danneggiare o influenzare i successivi processi di trattamento, e per ridurre le emissioni in atmosfera.

I principali sono:

- Contaminanti gassosi: principalmente anidride carbonica(CO<sub>2</sub>), acido solforico(H<sub>2</sub>S), anidride solforosa(SO<sub>2</sub>), ossido di azoto(NO<sub>x</sub>), acido cloridrico(HCl) ed altri composti clorati;
- Composti carboniosi condensabili (tar);

- Metalli pesanti (Mercurio);
- Alkali e polveri;

Le principali reazioni che avvengono nella fase di gassificazione tra i prodotti della pirolisi (char solido e prodotti gassosi) e l'agente gassificante sono le seguenti con le rispettive entalpie standard ( $p=1\text{bar}, T=25^\circ\text{C}$ ):

- Reazioni di parziale combustione:



- Reazione di Boudouard:



- Reazione acqua-gas:



- Reazione di shift acqua-gas:



- Reazione di metanizzazione:



Le reazioni elencate possono essere suddivise in base alla fase in cui avvengono e alla cessione o assorbimento di energia termica; reazioni caratterizzate da un'entalpia negativa sono esotermiche, mentre entalpie di reazione positive caratterizzano le endotermiche.

Per realizzare e mantenere il processo di gassificazione, come è stato detto, è necessario fornire del calore per consentire le reazioni endotermiche e le fasi di essiccazione e pirolisi.

Nei sistemi di gassificazione diretta il calore necessario viene fornito dalle reazioni esotermiche di parziale ossidazione. Per evitare sbilanciamenti e nello stesso tempo mantenere un buon rendimento termodinamico del processo è necessario che il bilancio di

calore prodotto e consumato sia tenuto sotto controllo, in modo da mantenere le temperature di funzionamento ottimali nelle varie parti del reattore.

Le reazioni di gassificazione vere e proprie sono quella di Boudouard, acqua-gas, di shift acqua-gas e quella di metanizzazione anche se il metano presente nel gas finale è in quantità modesta rispetto agli altri componenti e deriva principalmente da gas pirolitico che non ha reagito.

Le reazioni di ossidazione parziale oltre a fornire il calore per il processo, hanno come prodotto il monossido di carbonio che è uno dei principali componenti del syngas.

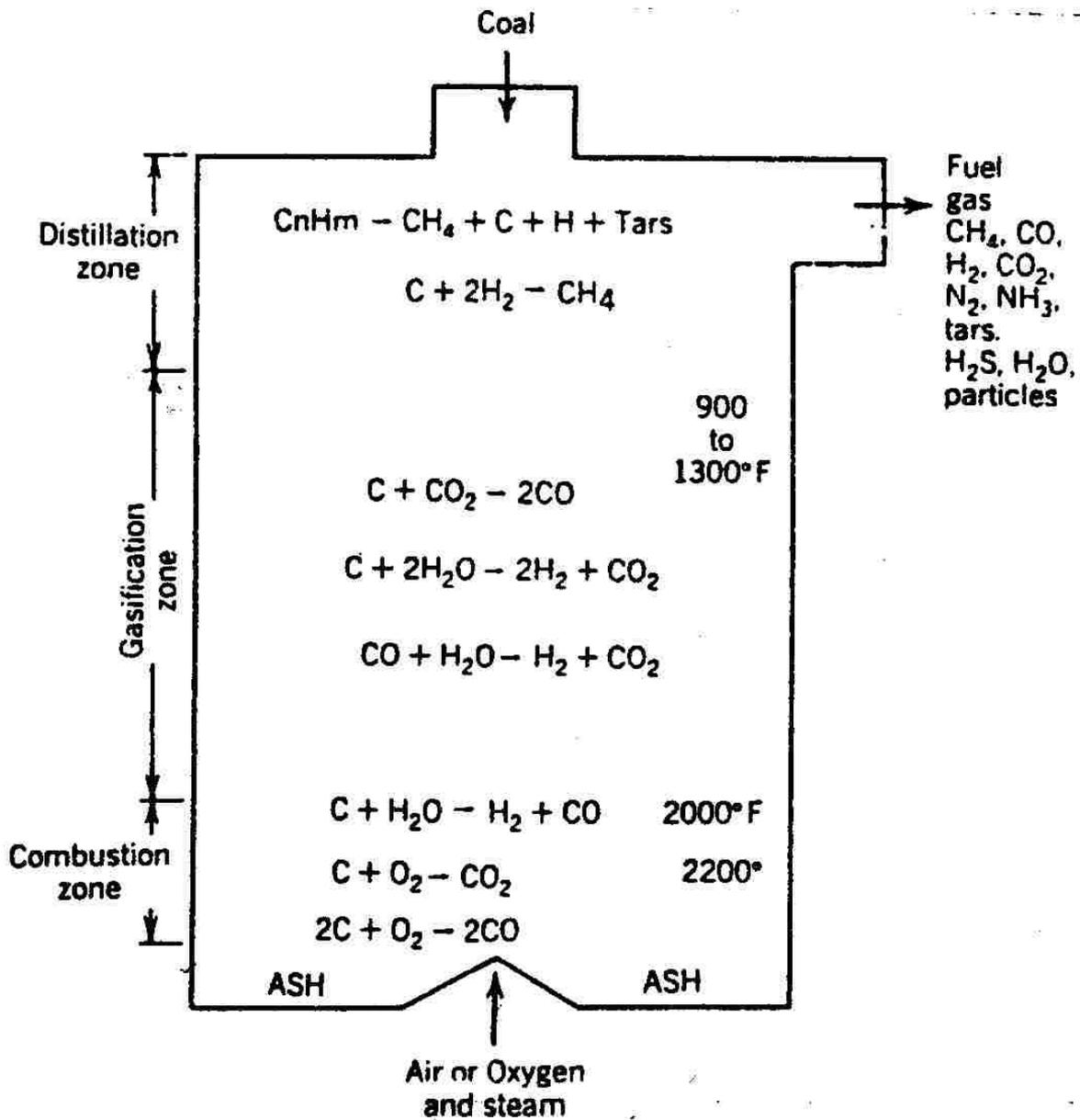


Figura 3.0.3 Schema generale di un gassificatore (es. per carbone)

## 3.2 Gassificazione del char

La gassificazione del char è una fase molto importante dell'intero processo.

Il char prodotto attraverso la pirolisi solitamente non è costituito da carbonio puro, ma contiene inevitabilmente anche dei composti idrati incluse molecole di idrogeno e ossigeno.

Il char prodotto da biomassa è generalmente molto più poroso rispetto ad un char ricavato dal carbone minerale (coke), la sua porosità è circa due-tre volte superiore con valori che spaziano dal 40 al 50%, inoltre anche le dimensioni di tali pori sono sull'ordine di 20-30 micron in luogo dei 5 angstrom del char da carbone minerale; per questo il char da biomassa è molto più reattivo di quest'ultimo.

Come introdotto precedentemente le reazioni che producono i componenti del gas finale sono le reazioni che avvengono tra il char (carbonio C) e l'agente gassificante; sono anche le reazioni più lente, in quanto partono dal char allo stato solido, e di fatto determinano la velocità dell'intero processo.

Da sottolineare che anche se la reazione di metanizzazione è di parecchi ordini di grandezza più lenta, concorre per quantità molto modeste. Le reazioni di gassificazione del char sono da tempo studiate ed esistono diversi modelli descrittivi; un modello, tra i più usati, per le reazioni di Boudouard e il modello di Ergun per la reazione acqua-gas. Entrambi caratterizzati da un processo in tre step:

- Per Boudouard



Nel primo step la  $CO_2$  si dissocia in un sito attivo libero di carbonio  $C_{fas}$ , dando origine ad una molecola superficiale ossidata complessa  $C(O)$  e rilasciando monossido di carbonio.

Nel secondo step la reazione procede e la molecola ossidata complessa interagisce con il CO dando luogo a una molecola di  $CO_2$  e un nuovo sito attivo libero di carbonio  $C_{fas}$ .

Nel terzo step il desorbimento della molecola complessa dà luogo ad una molecola di CO.

- Per il modello riguardante la reazione acqua-gas vi sono molte analogie:



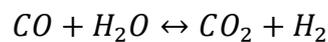
In questa reazione è la molecola d'acqua che si dissocia presso un sito attivo libero di carbonio, generando sempre una molecola ossidata complessa e rilasciando dell'idrogeno molecolare  $H_2$ .

Il secondo ed il terzo step sono simili alla reazione descritta in precedenza.

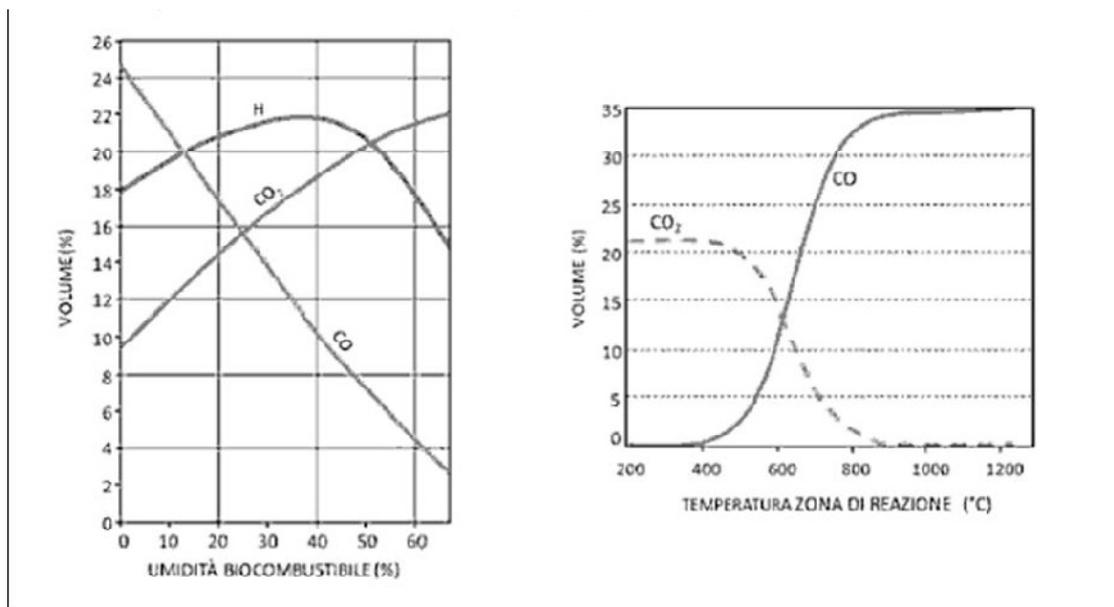
Per entrambi i modelli la velocità di reazione è limitata dal tempo necessario al desorbimento della molecola superficiale complessa.

### 3.3 Reazione di shift

La reazione di shift è un'importante reazione in fase gassosa. Questa reazione incrementa la quota di idrogeno contenuto nei prodotti finali della gassificazione in luogo del monossido di carbonio.



La reazione di shift è una reazione esotermica, anche se con valore di energia rilasciata molto basso, per cui il punto di equilibrio dipende molto dal valore della temperatura.



**Figura 3.0.4** Variazione della composizione della miscela gassosa al variare dei parametri operativi: effetto dell'umidità sul combustibile (sinistra) ed effetto della temperatura della zona di reazione (destra).

Tutte le reazioni di gassificazione del char e di shift sono reversibili, cioè possono avvenire in entrambi i sensi a seconda delle condizioni in cui si trovano prodotti e reagenti.

In realtà varia solamente la velocità della reazione diretta o inversa, in quanto sono praticamente sempre presenti entrambe. Per ogni reazione è possibile determinare una costante di proporzionalità  $k$  dipendente dalla temperatura e la velocità di reazione  $r$  dipendente dalle concentrazioni molari dei reagenti.

Prendendo come esempio la reazione di Boudouard si ricava che:

$$r_d = k_d \cdot [C] \cdot [CO_2]$$

La concentrazione riferita ad una sostanza in stato solido è unitaria, dunque:

$$r_d = k_d \cdot [CO_2]$$

Per la reazione inversa si ricava che:

$$r_i = k_i \cdot [2CO]$$

In condizioni di equilibrio le velocità delle reazioni si equivalgono e si ottiene:

$$K_p = \frac{k_i}{k_d} = \frac{[2CO]}{[CO_2]}$$

Con le ipotesi di gas ideale, le concentrazioni molari possono essere sostituite con le pressioni parziali  $p$  e poi con le frazioni molari  $x$  ricavando:

$$K_p = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} = \frac{x_{CO}^2}{x_{CO_2}} \cdot P$$

Con  $P$  si intende la pressione assoluta del gas.

La costante di equilibrio in relazione alla temperatura si può esprimere con la seguente relazione (ipotizzata per condizioni di equilibrio chimico):

$$\ln K_p = \frac{-\Delta G_T^0}{RT}$$

Dove  $T$  è la temperatura in Kelvin,  $R$  la costante universale dei gas e  $\Delta G_T^0$  rappresenta la variazione di energia libera di Gibbs passando dai reagenti a prodotti.

Per una data temperatura di reazione è possibile determinare la concentrazione dei composti chimici che partecipano alla reazione nelle condizioni di equilibrio noti i valori di: pressione, costante di equilibrio  $K_p$  relativa a tale temperatura e il quantitativo di partenza di ogni reagente.

## 3.4 Il rapporto di equivalenza

Il rapporto di equivalenza è un parametro definito come la quantità di aria immessa nel sistema rispetto alla quantità d'aria richiesta per una combustione stechiometrica.

Al variare del rapporto di equivalenza il processo di conversione può essere identificato come:

- pirolisi (ER=0);
- gassificazione (ER=0,25-0,5);
- combustione (ER=1).

In un processo di gassificazione dove il combustibile è costituito principalmente da C, H e O la temperatura adiabatica di reazione della biomassa è determinata dal rapporto di equivalenza ER, in altre parole dipende dall'ossigeno consumato durante la reazione.

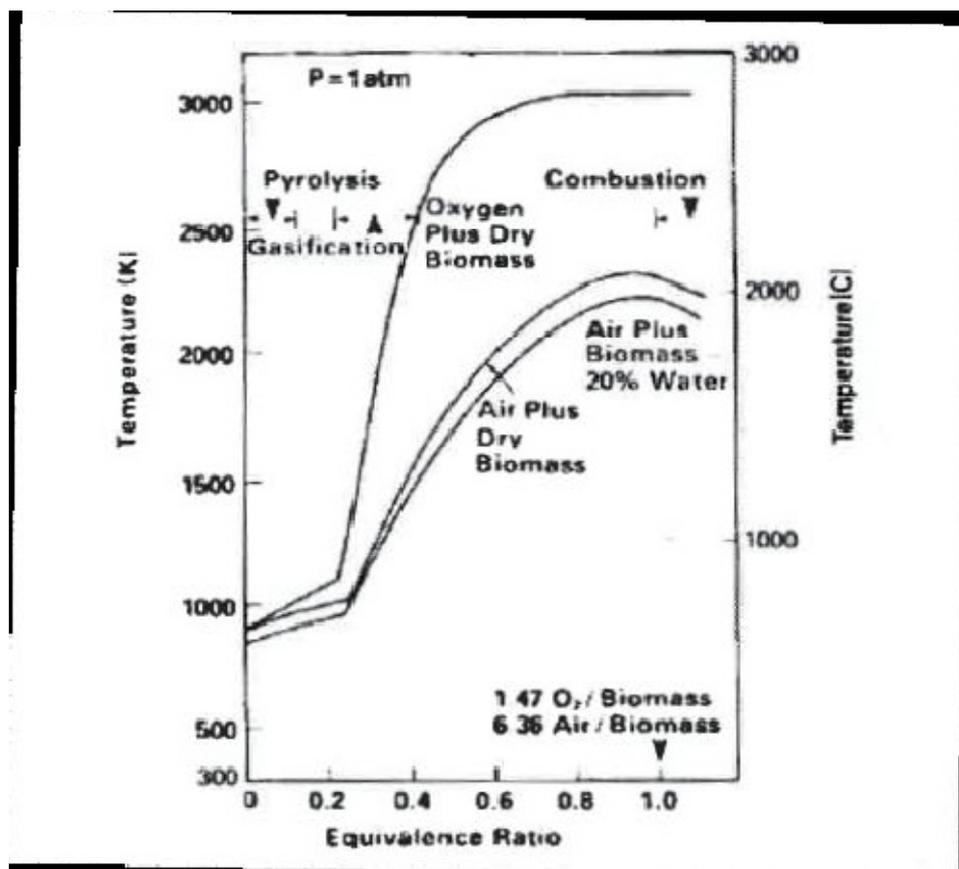


Figura 3.0.5 Temperatura di reazione della biomassa al variare del rapporto di equivalenza e dell'umidità

In figura 3.0.5 è stata riportata la reazione di una biomassa a pressione atmosferica ligno-cellulosica nei tre seguenti casi:

- reazione dell'ossigeno puro con biomassa secca;
- reazione di aria con la biomassa secca;
- reazione di aria con biomassa con umidità del 20%.

L'agente gassificante viene immesso alla pressione di 1 atm e alla temperatura di 25°C senza preriscaldamento.

Nel caso di aria, la temperatura raggiunta è parecchio inferiore, a parità di ER, rispetto all'impiego di ossigeno puro a causa della presenza dell'azoto inerte nella composizione.

Da notare che in corrispondenza a un valore di ER di circa 0,25, tutte le reazioni subiscono un repentino cambiamento di pendenza, con la temperatura che cresce molto più rapidamente.

La motivazione dipende dal fatto che oltre questi valori di ER aumenta l'ossigeno che reagisce con i prodotti pirolitici, permettendo dunque reazioni di combustione parziale sempre più complete fino all'eventuale combustione completa coincidente con ER= 1.

Nelle seguenti figure è riportata la composizione del gas prodotto e il potere calorifico inferiore in funzione del rapporto di equivalenza ER e dell'agente gassificante, oltre all'andamento delle temperature già descritto.

Nel caso di impiego di aria, possiamo constatare che, sempre per un valore di ER prossimo a 0,25-0,3 vi sono delle variazioni della concentrazione dei prodotti.

In particolare la concentrazione di CO e H<sub>2</sub> raggiunto un massimo iniziano a decrescere dopo questo valore, perché reagiscono con l'ossigeno del reattore dando luogo a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

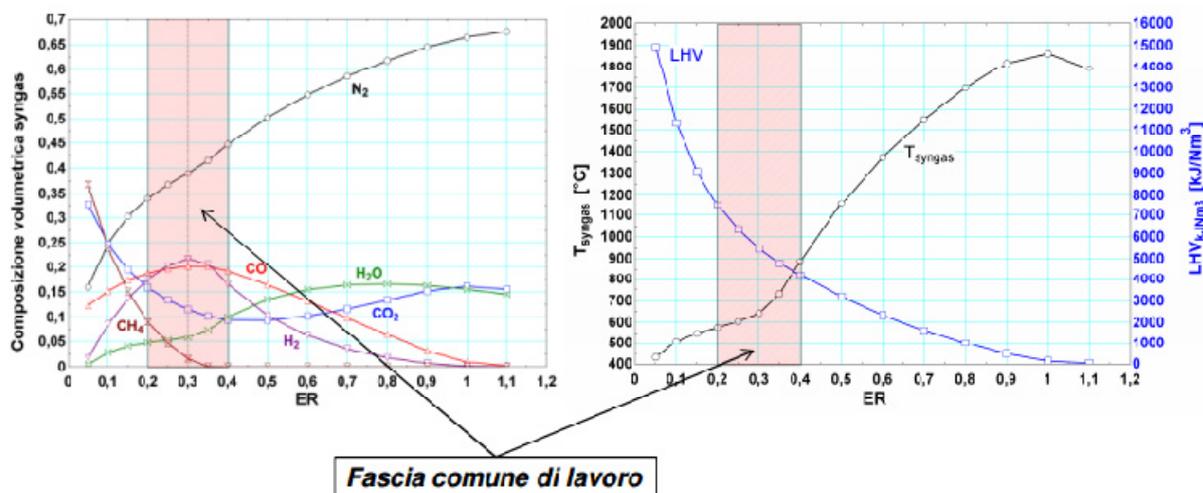


Figura 3.0.6 Composizione syngas e potere calorifico in funzione del rapporto di equivalenza. Agente gassificante aria ambiente

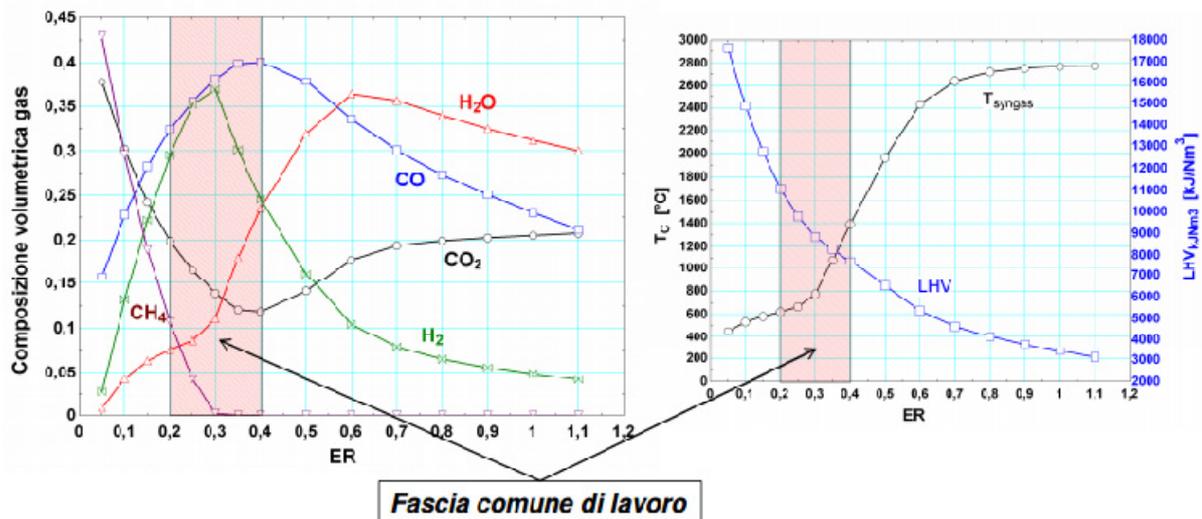
Nella figura 3.0.7 invece è diagrammato l'andamento delle concentrazioni e temperature nel caso di impiego di ossigeno puro come agente gassificante.

Oltre ai valori delle temperatura e potere calorifico inferiore (LHV) più elevati, variano anche i valori della concentrazione dei prodotti.

Da notare che sempre in corrispondenza ad un valore di ER prossimo a 0,3, si rileva la repentina variazione del valore dei prodotti CO e H<sub>2</sub>.

Il potere calorifico viene calcolato come la somma dei poteri calorifici dei singoli componenti del gas prodotto (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ecc) in proporzione alla frazione molare di ciascuno.

La curva relativa alla reazione con aria descrive chiaramente valori inferiori a causa dell' N<sub>2</sub> che diluisce il contenuto energetico del gas.



**Figura 3.0.7** Composizione syngas e potere calorifico in funzione del rapporto di equivalenza. Agente gassificante ossigeno puro

## 3.5 Rendimento del processo di gassificazione

Il rendimento del processo di gassificazione può essere espresso in diversi modi e in base a diversi parametri. Se consideriamo solamente il processo di conversione della biomassa in combustibile gassoso, il rendimento solitamente considerato è quello energetico definito come rapporto tra il potere calorifico del gas prodotto e quello della biomassa in ingresso.

$$\eta_e = \frac{P.C.I_g \cdot Q_g}{P.C.I_b \cdot m_b}$$

$P.C.I_g$ : potere calorifico inferiore del syngas [KJ/m<sup>3</sup>].

$Q_g$ : portata volumetrica del gas prodotto [m<sup>3</sup>/s].

$P.C.I_b$ : potere calorifico inferiore biomassa [kJ/kg].

$m_b$ : portata biomassa in ingresso [kg/s].

L'espressione del rendimento appena scritta rappresenta di fatto il rapporto tra il contenuto di energia chimica del syngas e quello della biomassa. Se invece si intende sfruttare anche il calore del syngas prodotto attraverso un recuperatore, questa quota di energia recuperata viene inserita nella seguente espressione definita *hot gas efficiency*:

$$\eta_{e,hot\,eff.} = \frac{(P.C.I_g \cdot Q_g) + (Q_g \cdot \rho_g \cdot c_p \cdot \Delta T)}{P.C.I_b \cdot m_b}$$

$\rho_g$ : densità del gas prodotto [kg/m<sup>3</sup>].

$c_p$ : calore specifico del gas prodotto [kJ/kg K].

$\Delta T$ : differenza di temperatura tra il gas prodotto e il combustibile in ingresso.

Il rendimento energetico viene di norma sempre usato per descrivere le prestazioni dell'impianto, anche se ha diversi svantaggi: non considera il contenuto energetico ancora presente nel char non convertito, non considera le variazioni di entropia del processo, necessita per essere completo e veritiero di considerare tutti gli scambi di calore.

Per questo il rendimento exergetico è sicuramente più idoneo a descrivere il processo di gassificazione nella sua totalità.

Considerando il syngas come unico prodotto, troviamo il seguente rendimento:

$$\eta_{ex,gas} = \frac{E_g}{E_b + E_a}$$

$E_g$ : exergia del gas prodotto [kJ/g<sub>biomassa</sub>].

$E_b$ : exergia della biomassa [kJ/ g<sub>biomassa</sub>].

$E_a$ : exergia dell'agente gassificante [kJ/ g<sub>biomassa</sub>] (nel caso di aria in condizioni ambiente, 25°C e 1Atm, l'exergia è pari a 0).

Considerando anche il char non convertito come prodotto si ottiene la seguente espressione del rendimento:

$$\eta_{ex,gas+char} = \frac{E_g + E_{char}}{E_b + E_a}$$

$E_{char}$ : exergia del char residuo [kJ/ g<sub>biomassa</sub>].

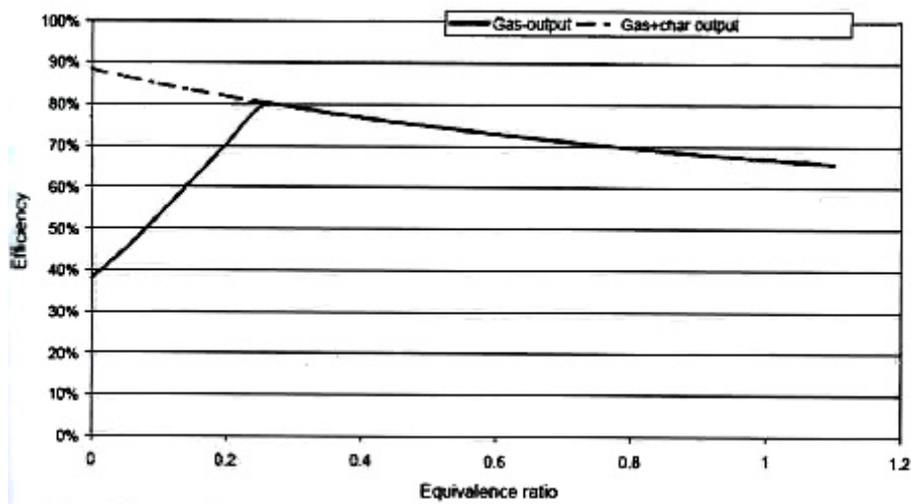


Figura 3.0.8 Rendimento di gassificazione in funzione del rapporto di equivalenza

Diagrammando l'andamento delle due espressioni dei rendimenti si può vedere che in corrispondenza a ER pari a 0,25 le curve cambiano pendenza, in quanto a tale valore del rapporto di equivalenza coincide il limite di conversione del char solido, prima di tale valore i rendimenti si discostano in quanto è ancora presente del char solido.

Il punto limite di conversione del char, pari a  $ER=0,25$ , è il punto di ottimo operativo per un gassificatore downdraft, nel caso in esame come agente gassificante viene usata aria ambiente.

Alle stesse conclusioni si giunge anche da un'analisi del rendimento energetico di primo approccio  $\eta_e$ .

### 3.5.1 Influenza della pressione di lavoro

In linea di principio tutti i gassificatori possono operare a pressione atmosferica o essere pressurizzati: nel funzionamento a pressione atmosferica la configurazione d'impianto, la gestione delle ceneri e dell'alimentazione e l'interfaccia con l'apparato di depurazione sono relativamente semplici; mentre il funzionamento in pressione, seppure più complesso e più costoso, permette di ottenere un gas di sintesi più pregiato e di recuperare energia dall'eventuale espansione del gas stesso.

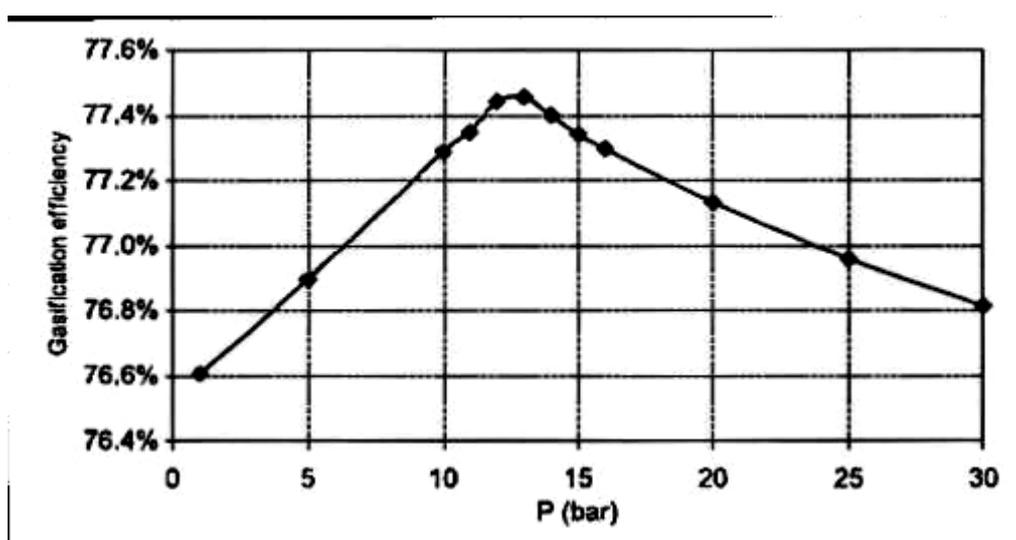


Figura 3.0.9 Rendimento gassificazione in funzione della pressione operativa del reattore

Analizzando l'andamento del rendimento energetico di conversione, riferito sempre a un processo di gassificazione ad aria a  $T=25^{\circ}\text{C}$  e  $ER=0,23$ , il massimo coincide con una pressione operativa di circa 12-13 bar.

Aumentando la pressione si ottiene un incremento della produzione di  $\text{CH}_4$ , che però non è sufficiente a bilanciare la diminuzione del  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$  e quindi nella totalità si assiste ad una diminuzione dell'efficienza del processo.

I costi di installazione, fino a quattro volte superiori a parità di potenza, sono imputabili alle attrezzature necessarie per operare in pressione e per garantire la sicurezza del funzionamento, e per questo sono giustificati solo per gassificatori di una certa potenza termica, quasi esclusivamente a letto fluido del tipo B.F.B. e C.F.B..

Quando il gas prodotto è in pressione può essere utilizzato direttamente in una turbina a gas, evitando così di raffreddarlo e comprimerlo tramite un compressore con un notevole dispendio energetico. Nei processi atmosferici è necessario raffreddare il gas prima della compressione per ridurre il volume specifico e quindi diminuire il lavoro di compressione e per evitare che la temperatura all'uscita del compressore sia troppo elevata con il rischio di danneggiarlo. Il gas da inviare al compressore deve inoltre avere un contenuto molto basso di tar e contaminanti per evitare sporcamenti e depositi. Nel caso di utilizzo di gas già in pressione in una turbina a gas, eventuale tar presente non provoca particolari problemi, a patto che venga completamente bruciato nel combustore della turbina stessa.

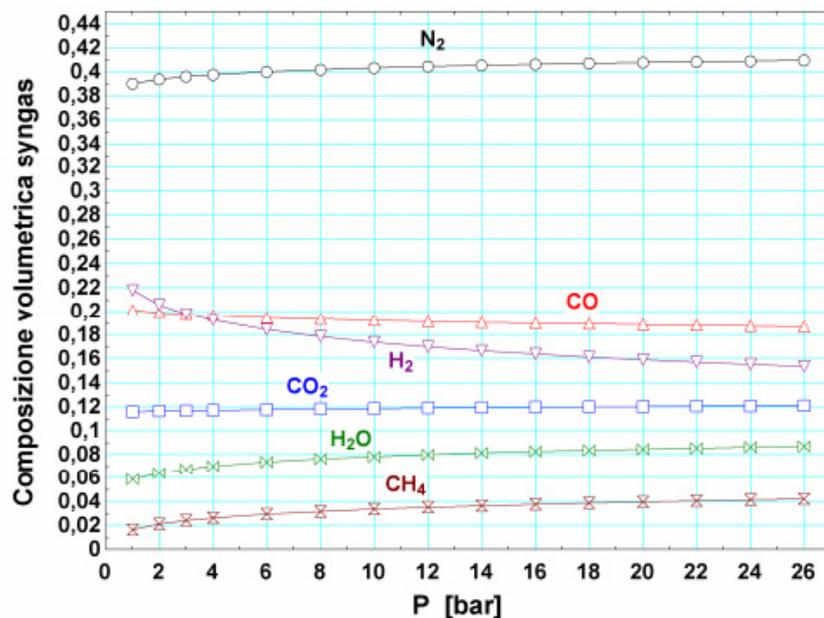


Figura 3.0.10 Composizione volumetrica syngas in funzione della pressione operativa

In generale, i vantaggi dell'operare in pressione sono:

- il recupero energetico dalla combustione del tar;
- lo sfruttamento del calore sensibile del syngas;
- l'assenza della necessità di una compressione.

Per contro vi sono tipicamente delle perdite di pressione dal sistema di carico del combustibile e scarico ceneri.

Il rendimento totale di conversione resta comunque elevato e superiore ai gassificatori atmosferici.

### **3.6 Impiego e caratteristiche del syngas**

La conversione termochimica di biomasse per la produzione di syngas tipicamente dà luogo a un gas grezzo contenente impurità sia organiche che inorganiche.

Tra le impurità inorganiche di interesse, sono da considerare l'idrogeno solforato, l'acido cloridrico, l'ammoniaca e le tracce di metalli alcalini.

Le impurità organiche rappresentano invece una classe molto ampia di sostanze che vanno dagli idrocarburi leggeri a strutture ad alto peso molecolare di idrocarburi policiclici aromatici, e all'interno di questa distribuzione è presente il tar.

Il "tar" (catrame) secondo la definizione fornita dal Comitato Europeo per la standardizzazione (CEN) è costituito da "tutti i composti organici presenti nei gas prodotti durante la gassificazione esclusi gli idrocarburi gassosi da C1 a C6".

In generale il tar è un contaminante che deve essere rimosso prima che il syngas venga utilizzato sia nei processi dell'industria chimica che nella conversione in energia in turbine o in motori a combustione interna.

L'altro contaminante compreso tra le impurità organiche e che può causare grossi problemi durante l'utilizzo del syngas è il particolato: è infatti ormai accettato che la quantità di particolato ammessa nel syngas per un suo utilizzo in motori a combustione interna è pari a 50mg/m. È quindi importante e necessaria una corretta valutazione dei quantitativi di tar e particolato presenti nel syngas. Questo è tanto più vero per il syngas ottenuto dalla gassificazione di combustibili come carboni di basso rango e biomasse, dove l'alto contenuto di sostanze volatili determina la presenza di grosse quantità di tar e particolato, che devono pertanto essere quantizzati e rimossi.

Allo scopo sono disponibili in letteratura vari sistemi sia per il campionamento e l'analisi che per la rimozione.

Perché un gas possa essere utilizzato come combustibile in una turbina o in un motore a combustione interna, esso deve rispondere a ben determinati requisiti soprattutto per quanto riguarda tar e particolato, responsabili rispettivamente di incrostazioni e di fenomeni di erosione.

Per raggiungere i requisiti richiesti è necessario che il syngas sia raffreddato e depurato del tar e della polvere. Per il controllo e la rimozione del tar le metodologie a disposizione sono fondamentalmente due e dipendono da dove il tar viene rimosso, se all'interno del gassificatore (metodi primari) o all'esterno (metodi secondari).

### **3.7 Tipologie di gassificatori**

Attualmente esistono in commercio o allo stato di prototipo molteplici tipologie e taglie di gassificatori.

Possiamo operare una classificazione in base a diversi aspetti tecnici e funzionali, ma di norma si opera una prima distinzione tra gassificatori di tipo diretto e gassificatori di tipo indiretto.

Nei gassificatori di tipo diretto è la combustione di una parte dei prodotti pirolitici che fornisce calore per la pirolisi e la gassificazione stessa e avviene di fatto dentro lo stesso reattore; nei gassificatori di tipo indiretto la combustione avviene in un combustore separato e il calore è trasportato verso la zona di pirolisi da un flusso incandescente di sabbia o altro materiale idoneo (il trasporto del calore è il punto critico di questa tecnologia e ne ha rallentato lo sviluppo).

Ulteriori criteri di classificazione dei gassificatori sono: la pressione di esercizio, l'agente gassificante utilizzato, il tipo di costruzione interna.

La pressione di esercizio nei gassificatori di tipo indiretto è normalmente pari o di poco superiore a quella atmosferica, mentre in quelli di tipo diretto si possono raggiungere pressioni notevolmente superiori, con il vantaggio di avere un prodotto finale costituito da syngas che non necessita di essere compresso.

La scelta dell'agente gassificante è un aspetto molto importante, perché le caratteristiche del gas di sintesi prodotto dipendono direttamente da questa scelta.

La composizione e il potere calorifico variano molto con l'agente gassificante: con aria il gas ha un basso contenuto energetico specifico, sull'ordine di 4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>, operando invece con ossigeno puro come agente gassificante si ottiene un gas con un potere calorifico più elevato, con valori tra 12 e 18 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Il tipo di costruzione interna del gassificatore è il parametro di distinzione più comunemente usato, abbiamo dunque:

- Gassificatori a letto fisso;
- Gassificatori a letto fluido;
- Gassificatori a letto trascinato.

A loro volta i gassificatori a letto fisso si distinguono in base al moto relativo che internamente la biomassa affronta rispetto al flusso dell'agente gassificante; si dividono in:

- Equicorrente (downdraft);
- Controcorrente (updraft).

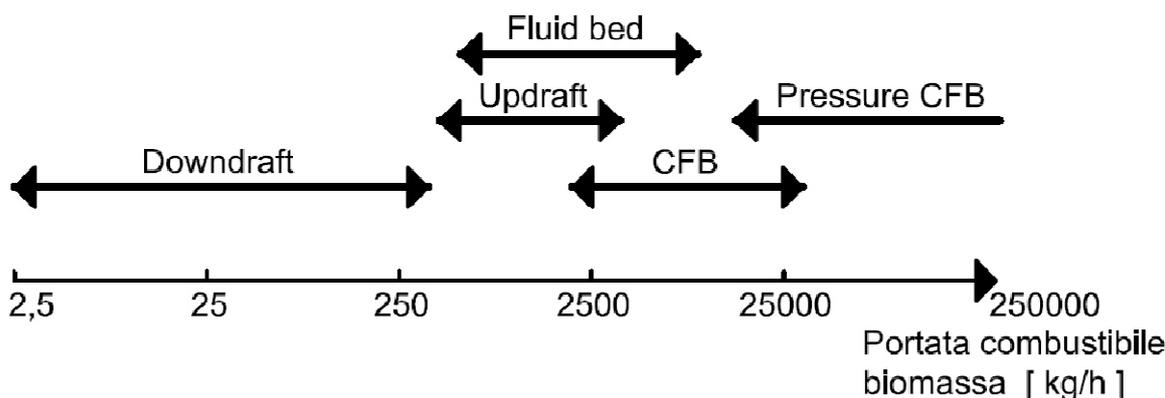
Le tipologie di gassificatori a letto trascinato e a ciclone (che verrà citata più avanti) possono essere di fatto incluse tra i gassificatori a letto fluido. La seguente tabella racchiude tutte le tipologie esistenti.

Gassificatore	Atmosferico	Pressurizzato	Acronimo
A letto fluido circolante	•	•	C.F.B. (Circulating Fluidized Bed)
A letto fluido bollente	•	•	B.F.B. (Bubbling Fluidized Bed)
A letto fisso controcorrente	•		U.G. (Updraft Gasifier)
A letto fisso equicorrente	•		D.G. (Dawndraft Gasifier)
A letto trascinato	•		E.B.G. (Entrained Bed Gasifier)
A ciclone	•		C.G. (Cyclonic Gasifier)

**Tabella 3.0.3** Tipologie di gassificatori

La scelta di una data configurazione deve essere ponderata in base alle caratteristiche della biomassa impiegata, la potenza richiesta, la composizione del gas di sintesi ottenuto e ai costi dell'intero impianto.

Dalle esperienze impiantistiche vissute finora e dai vari problemi riscontrati è possibile, note le esigenze specificate precedentemente, indirizzare già il proprio interesse verso una tipologia specifica di gassificatore. Nella figura sottostante vengono rappresentate le taglie dei gassificatori in funzione della portata di combustibile trattato.



**Figura 3.0.11** Tipologie di gassificatori in funzione della portata oraria di combustibile

Nel seguito verrà condotta un'analisi delle principali tipologie di gassificatori, con particolare attenzione alle prestazioni, caratteristiche di funzionamento e problematiche riscontrate.

### 3.8 Gassificatori a letto fisso

I gassificatori a letto fisso vengono così definiti perché caratterizzati da una griglia che supporta la zona di reazione, e che separa la zona di gassificazione dalla zona di riduzione. Come specificato in precedenza si distinguono in due ulteriori tipologie, equicorrente e controcorrente, essenzialmente a seconda del punto di immissione dell'agente gassificante, e di prelievo del gas di sintesi.

I gassificatori a letto fisso sono indicati per potenze medio-piccole, (fino a portate di combustibile di 2500 kg/h ) in quanto comportano l'utilizzo di tecnologie costruttive e di gestione relativamente semplici e affidabili. Per potenze superiori, e dunque dimensioni superiori del reattore, si possono incontrare problemi relativi al deflusso interno della biomassa, detti problemi di ponteggio, che comportano oltre ad un flusso gassoso non omogeneo anche una distribuzione non ottimale delle temperature nella zona di reazione.

Temperature che in condizioni operative spaziano in un ampio range di valori, tra 200°C fino a 1200°C, mentre in condizioni di criticità (nel caso di ponteggio della biomassa) possono raggiungere i 1500°C con possibilità di fusione delle ceneri.

Temperature non uniformi hanno inoltre ripercussioni sulle reazioni di gassificazione e dunque sulla composizione finale del syngas.

Il syngas di norma è prodotto attraverso l'impiego di aria come agente gassificante, in accordo con la semplicità costruttiva, ed ha un potere calorifico inferiore compreso tra i 4 e i 6 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Il combustibile di alimentazione è normalmente costituito da biomassa ligno-cellulosica ridotta di dimensione attraverso cippatura; altri tipi di biomasse derivanti da culture erbacee non vengono impiegati.

Sintetizzando, i vantaggi di questa tecnologia sono: la produzione di un syngas di buona qualità e relativamente pulito, un alto valore di conversione del char e pochi problemi legati alla pulizia interna del reattore.

Gli svantaggi sono principalmente dovuti alla difficoltà di implementare questa tecnologia in taglie maggiori dove risulta difficoltoso ottenere distribuzioni ottimali delle temperature interne compromettendo così l'andamento delle reazioni. Il combustibile introdotto deve inoltre avere un basso grado di umidità, già idoneo all'utilizzo.

### 3.8.1 Gassificatori a letto fisso Downdraft

I gassificatori di tipo equicorrente sono caratterizzati da un moto relativo della biomassa combustibile e del gas nella stessa direzione.

L'alimentazione avviene dall'alto del reattore, l'agente gassificante viene immesso lateralmente in corrispondenza della zona di gassificazione e l'estrazione del syngas e della cenere avvengono dal basso.

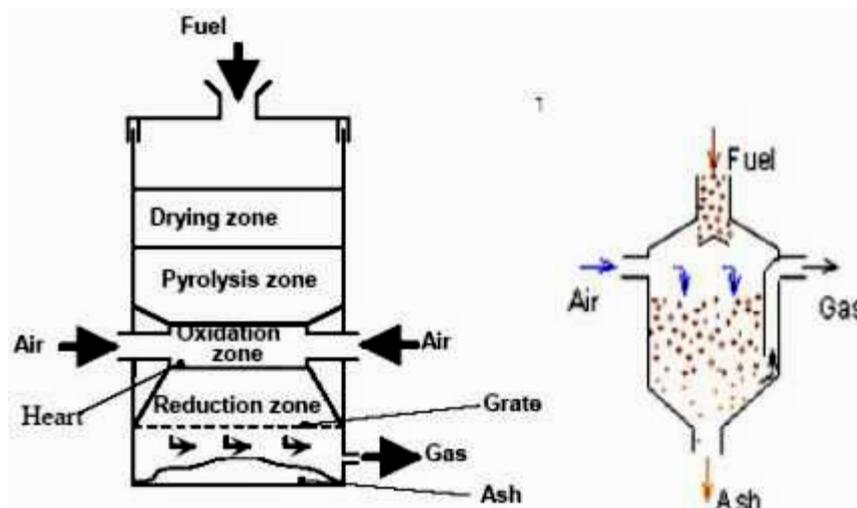


Figura 3.0.12 Schema gassificatore downdraft

La biomassa attraverso il sistema di caricamento viene inserita dalla sommità del reattore dove subisce una prima fase di essiccazione a temperatura tra i 200 e 600°C, procedendo nel reattore si trova la zona di devolatilizzazione dove avviene la pirolisi della biomassa a temperature tra i 600 e 1000°C.

Il calore necessario per queste prime due fasi, essendo il gassificatore di tipo diretto, deriva dalla combustione di una parte dei prodotti della pirolisi, e si propaga essenzialmente per radiazione e in parte per convezione.

I prodotti della pirolisi, char e gas, passano successivamente nella zona di ossidazione, a temperatura prossima ai 1200°C, dove avviene la combustione di una parte di questi a seconda del progetto del gassificatore e delle condizioni operative.

In corrispondenza della zona di ossidazione avviene anche l'insufflaggio dell'agente gassificante, che nella successiva zona di riduzione, interagendo con i prodotti derivanti dall'ossidazione, (CO<sub>2</sub>, char, vapore acqueo), dà luogo alle reazioni di riduzione che formano il syngas finale.

I valori in tabella sono relativi alla composizione tipica del syngas prodotto con un reattore downdraft.

Agente ossidante	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	Contenuto ceneri
ARIA	11	24	9	3	53	Medio

**Tabella 3.0.4** Composizione media percentuale syngas da gassificatore downdraft

La zona di ossidazione è collocata in corrispondenza ad un restringimento della sezione interna del reattore, detta zona di gola; attraverso questo accorgimento si crea una zona concentrata ad alta temperatura attraverso la quale passano i gas pirolitici con il risultato di degradare per via termica il tar che contengono.

Il diametro di questa sezione ristretta è calcolato a partire da molteplici parametri, e di norma è un valore di compromesso per realizzare una buona pulizia dei gas pirolitici (velocità di passaggio dei gas non troppo elevata) e massimizzare la portata di combustibile trattata dal reattore.

Il gas prodotto fuoriesce molto caldo dal reattore (800-900°C), per cui deve essere raffreddato prima dell'impiego, inoltre possiede un basso contenuto di tar grazie al thermal cracking<sup>3</sup> nella zona a più alta temperatura.

Per contro il contenuto di particolato nel gas è elevato, e dopo la fase di raffreddamento è necessaria un'accurata filtrazione.

Per un corretto funzionamento del gassificatore è necessario impiegare come combustibile biomassa relativamente secca, con grado di umidità inferiore al 30%, in quanto non essendoci scambio termico tra il gas ad alta temperatura e la biomassa in ingresso, la fase di essiccazione è meno efficace.

Inoltre, bisogna evitare pezzature troppo elevate del combustibile che possono favorire fenomeni di ponteggio e intasamento della sezione di gola.

In sintesi questi gassificatori costituiscono una tecnologia semplice e affidabile, il principale vantaggio consiste sempre nel produrre un gas con ridotto contenuto di tar e quindi adatto all'impiego in motori a combustione interna per cogenerazione su piccola scala previo raffreddamento ed eliminazione delle ceneri che contiene. Necessitano però di una biomassa relativamente secca e con pezzatura regolare, caratteristiche per altro riscontrabili in un cippato standard senza particolari accorgimenti.

---

<sup>3</sup> Il cracking termico del tar consiste nella distruzione delle molecole che lo compongono mediante l'esposizione ad alta temperatura, fino anche a 1000°C. Il valore minimo della temperatura per garantire la distruzione dipende dalla composizione del tar stesso e dalle condizioni operative.

### 3.8.2 Gassificatori a letto fisso Updraft

In questa tipologia di gassificatori, il moto della biomassa è opposto a quello dell'agente gassificante e del syngas; l'alimentazione avviene sempre dalla sommità del reattore come l'estrazione del gas prodotto mentre l'immissione dell'agente gassificante e l'estrazione delle ceneri avvengono dal fondo.

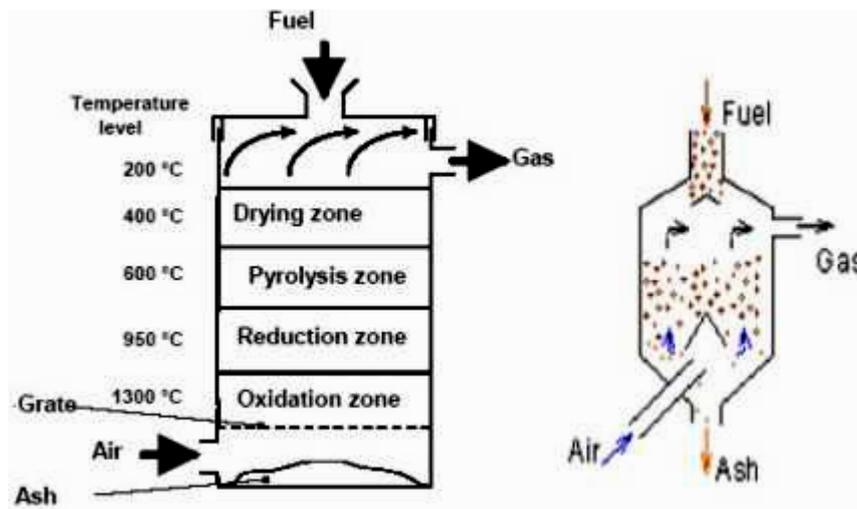


Figura 3.0.13 Schema gassificatore updraft

Una volta caricata la biomassa subisce una prima essiccazione nell'omonima zona del reattore a una temperatura prossima ai 400°C, seguita poi dalla zona di pirolisi dove avviene la devolatilizzazione del combustibile con formazione di char e gas volatili.

In questa tipologia di reattori la zona di riduzione, dove avvengono le principali reazioni di gassificazione del char, vapore acqueo e CO<sub>2</sub> è interposta tra la precedente zona di pirolisi e la zona di ossidazione, dove la combustione di una parte dei prodotti pirolitici, a temperatura di 1000-1300°C, fornisce il calore per tutto il processo.

Calore distribuito prevalentemente dal flusso dei gas in controcorrente rispetto alla biomassa. Al margine inferiore del reattore troviamo la griglia interna, con lo scopo di sostenere il char che reagisce, nella fase di combustione, con l'ossigeno contenuto nell'agente gassificante immesso da sotto la griglia stessa.

I prodotti dell'ossidazione, CO<sub>2</sub> e vapore acqueo, fluiscono verso l'alto, mentre la cenere residua si accumula sul fondo del gassificatore.

Da notare che non è presente alcuna zona di gola o restringimenti della sezione del gassificatore.

Il gas prodotto esce dal reattore ad una temperatura relativamente bassa, circa 200-300°C, dopo aver ceduto calore alla biomassa di alimentazione, di norma ha un contenuto di tar non trascurabile, tanto da obbligare all'impiego di un sistema di pulizia (gas clearing) prima dell'utilizzo finale.

Il motivo di tale inquinamento del gas deriva dal fatto che, durante la reazione di pirolisi viene prodotta una notevole quantità di tar sottoforma di vapori, una buona parte di questi vapori viene trascinato verso l'alto dal deflusso del gas, dove una parte condensa al contatto con la biomassa nella zona di essiccazione e una parte la ritroviamo nel syngas finale.

Di fatto non avviene alcun thermal cracking del tar.

L'agente gassificante normalmente impiegato è aria ambiente, anche se in qualche caso è stato sperimentato l'impiego di ossigeno.

Agente ossidante	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	Contenuto ceneri
ARIA	17	21	13	1	48	Basso
OSSIGENO	32	48	15	2	3	Basso

**Tabella 3.0.5** Composizione media percentuale syngas da gassificatore updraft

La sezione interna del gassificatore, regolare lungo tutto il percorso, permette l'utilizzo di biomassa di dimensioni eterogenee in quanto i rischi di ponteggio sono minori; resta il fatto che la riduzione in piccole parti del combustibile ne aumenta la superficie attiva facilitando le reazioni.

La configurazione controcorrente inoltre permette un efficace processo di essiccazione del combustibile di alimentazione, permettendo l'impiego diretto di biomasse con umidità superiori al 50%.

### 3.8.3 Gassificatori a letto fisso Crossdraft

Il funzionamento dei gassificatori crossdraft è simile a quello descritto per gli updraft, la biomassa viene sempre caricata dall'alto, solo che le prese per l'immissione dell'agente gassificante e l'estrazione del gas sono poste lateralmente sullo stesso livello.

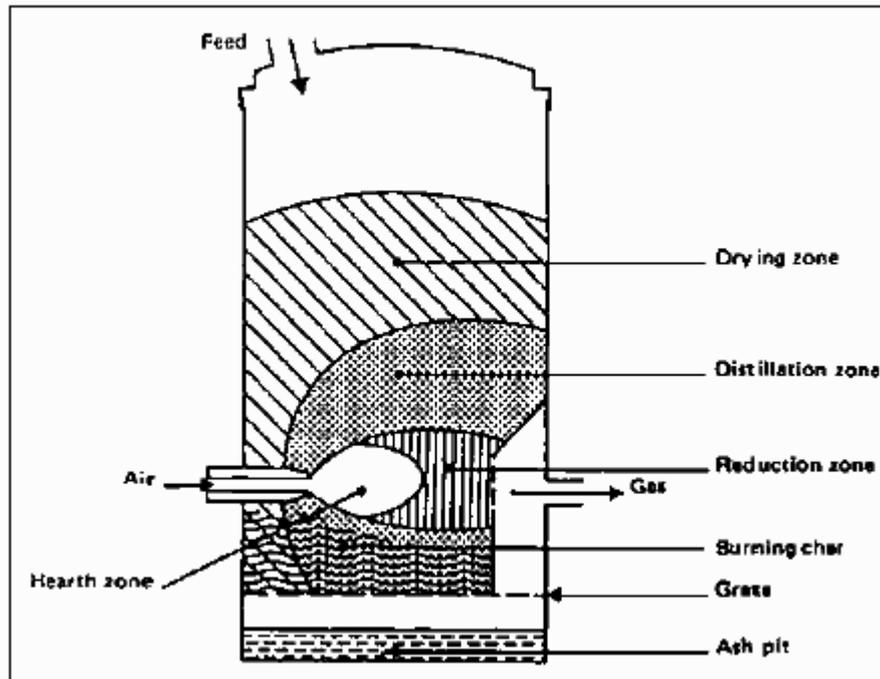


Figura 3.0.14 Schema gassificatore crossdraft

Le varie fasi del processo sono distinguibili in più zone concentriche a partire dal punto di immissione dell'agente gassificante, di norma aria, in corrispondenza al quale avviene la combustione di una parte dei prodotti pirolitici che fornisce il calore necessario alle adiacenti zone di riduzione, pirolisi ed essiccazione.

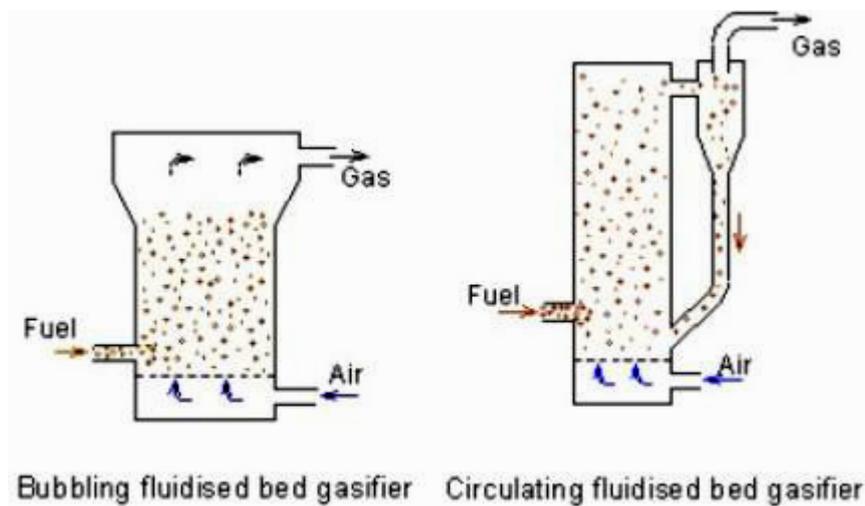
Una griglia sottostante sostiene il char reagente nella zona di ossidazione e permette lo scarico delle ceneri.

Il gas prodotto esce ad una temperatura elevata (800-900°C). In questo tipo di gassificatori non è realizzato alcun cracking termico del tar per cui il syngas prodotto necessita di un'accurata pulizia prima dell'impiego; la zona di essiccazione ha un funzionamento analogo alla conformazione downdraft con scambi di calore prevalentemente radiativi, è quindi opportuno impiegare una biomassa con grado di umidità relativamente basso.

I gassificatori crossdraft di fatto sono raramente alimentati con biomassa vegetale, ma è preferito l'impiego di carbone vegetale di buona qualità, per avere un syngas prodotto relativamente pulito.

### 3.9 Gassificatori a letto fluido

I gassificatori a letto fluido, in passato ampiamente utilizzati per la gassificazione del carbone, sono notevolmente impiegati anche per la conversione della biomassa.



**Figura 3.0.15** Schema gassificatore a letto fluido bollente (sinistra) e a letto fluido circolante (destra)

Per letto fluido si intende in generale una sospensione di particelle solide in una corrente ascendente di gas, che, raggiunta una determinata velocità, fa sì che il letto, composto da fase solida e da fase gassosa, si comporti come un vero e proprio liquido.

Applicata alla gassificazione, la tecnologia a letto fluido garantisce un'ottima miscelazione tra l'agente gassificante e la biomassa che viene immessa normalmente con una pezzatura tra i 20 e i 50 millimetri.

Operando in questo modo, rispetto ai sistemi a letto fisso, si ottiene una più uniforme distribuzione della temperatura nella zona di gassificazione, un aumento della velocità di reazione e una maggiore resa complessiva del syngas.

All'interno del reattore può essere poi presente anche del materiale inerte fluidizzante (sabbia silicea, allumina, ossidi refrattari), che ha il compito di migliorare la diffusione del calore tra le varie particelle di sostanza organica.

Uno dei principali problemi di questa tecnologia è la tendenza, per effetto delle alte temperature, alla sinterizzazione della sabbia silicea che tende poi a reagire con i metalli alcalini (Na e K) contenuti nella cenere; pertanto in presenza di biomasse con alto contenuto di cenere è opportuno sostituire questo agente fluidificante con allumina o composti metallici, come ad esempio sabbia cromitica.

Nelle applicazioni in cui è necessario invece l'uso di catalizzatori, quando cioè si deve favorire il processo di gassificazione o si intende modificare la composizione finale del gas di sintesi, i materiali inerti precedentemente menzionati possono essere sostituiti proprio dall'agente catalitico.

Le temperature di esercizio, uniformi su tutto il reattore, sono mediamente pari a 800–900 °C, mentre le taglie sono sempre superiori a 1 MW.

Il syngas ottenuto da questa categoria di gassificatori contiene comunque un significativo quantitativo di tar (superiore rispetto a quello presente nel gasogeno sviluppato dai gassificatori downdraft) nonché di particelle solide (char, cenere, sabbia) e pertanto le operazioni di pulizia sono ancora una volta necessarie.

Con questi sistemi, poi, è possibile operare anche in maniera pressurizzata, il vantaggio è quello di aumentare la capacità produttiva, e ridurre, o eliminare del tutto, la compressione a monte della turbina; questo nel caso in cui ovviamente il syngas venga utilizzato per alimentare un impianto turbogas.

Operando ad alta pressione poi diminuisce anche la tendenza a sinterizzare della cenere e si ha la possibilità di avere, rispetto ai gassificatori atmosferici, dimensioni più contenute dei reattori.

Se questi sono i principali aspetti positivi, non mancano tuttavia gli inconvenienti come ad esempio:

- la difficoltà nell'alimentazione della biomassa nel reattore;
- i costi di investimento maggiori rispetto a quelli sostenuti per i gassificatori atmosferici, bilanciati comunque da rendimenti più elevati (la convenienza economica si ha a partire da potenze di 30–50 MW);
- i dispositivi di pulizia a caldo del gas, che sono costosi e ancora in fase di sviluppo.

Allo stato attuale comunque l'utilizzo più efficace dei reattori PFB (*pressurized fluidbed*), per taglie superiori ai 100 MW, è quello connesso alla predisposizione di impianti IGCC (*Integrated Gassifier Com-bined Cycle*) dove la produzione di energia elettrica può raggiungere rendimenti anche del 35–40%.

### 3.9.1 Gassificatori a letto fluido bollente (BFB)

I gassificatori a letto fluido bollente sono costituiti da un reattore con all'interno una grata posta sul fondo e attraverso la quale viene introdotto l'agente gassificante e responsabile della movimentazione del letto fluido di materiale posto sopra la grata, nel quale viene introdotta la biomassa opportunamente preparata.

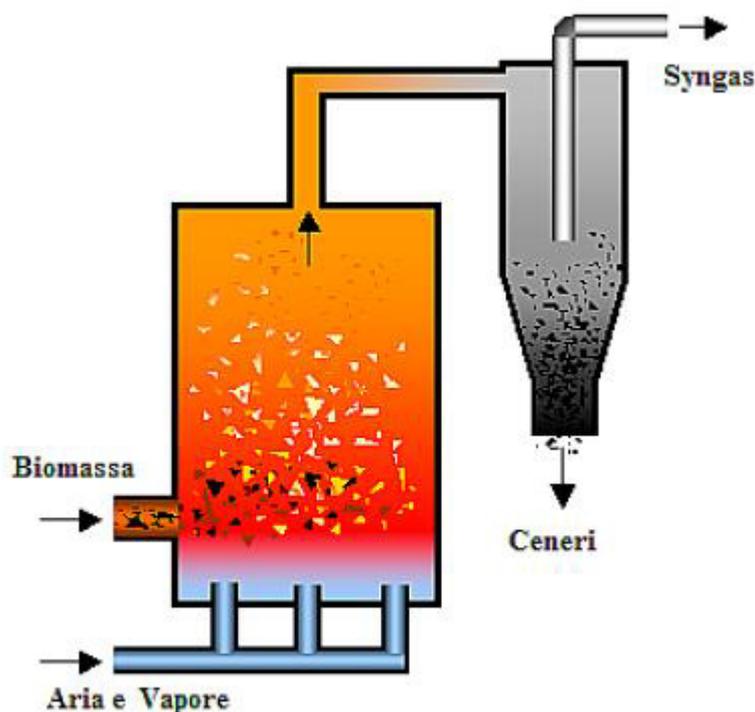


Figura 3.0.16 Schema gassificatore a letto fluido bollente (BFB)

In questi sistemi, l'altezza del letto, ovvero la regione nella quale il flusso ascendente di gas mantiene in sospensione la fase solida, è tipicamente compresa tra 1 e 2 metri; queste ridotte dimensioni si giustificano con il fatto che l'agente gassificante (aria, ossigeno o vapore) viene

immesso, alla base del reattore, ad una velocità non particolarmente elevata e comunque mai superiore ai 2 m/s.

All'interno di questa zona fluidizzata, che si colloca nella parte bassa del gassificatore subito sopra la griglia, la biomassa, introdotta lateralmente, viene pirolizzata a formare componenti gassose e parti carbonizzate che sono a loro volta convertite in syngas mediante le reazioni di riduzione.

Nel letto fluido si formano quindi delle vere e proprie bolle di gas che, una volta raggiunta la superficie, si liberano andando ad accumulare nella parte alta del reattore dove è presente una zona costituita unicamente da fase gassosa.

La formazione di queste bolle, poi, crea nel letto una sorta di ebollizione che ha l'effetto di migliorare ulteriormente l'agitazione interna e la miscelazione tra le varie fasi.

Le temperature operative, che vengono regolate tramite il semplice controllo del rapporto aria/biomassa, sono comprese tipicamente tra i 700 e i 900 °C e ciò permette di ottenere un syngas con un basso contenuto di catrami, che generalmente non supera i 3 g/Nm<sup>3</sup>.

Agente ossidante	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	Contenuto ceneri
ARIA	9	14	20	7	50	Medio

**Tabella 3.0.6** Composizione media percentuale syngas da gassificatore BFB

Differente è invece il discorso relativo alle ceneri. Queste, oltre ad essere presenti nel gas di sintesi in quantità abbastanza rilevanti (superiori rispetto ai gassificatori a letto fisso), tendono, se la temperatura interna è troppo alta, a raggiungere la condizione di fusione, creando così un pericoloso intasamento del reattore.

Per tale motivo si preferisce utilizzare come combustibili biomasse che presentano un elevato punto di fusione delle ceneri (> 1.000 °C); risultano quindi idonee quelle di natura ligno-cellulosica, mentre sono sconsigliabili i prodotti erbacei che porterebbero, per evitare questo problema, a limitare la temperatura di esercizio del reattore.

Il regime termico, che si cerca comunque di mantenere limitato per scongiurare il fenomeno della sinterizzazione, può considerarsi, grazie anche alla presenza di materiale inerte in sospensione nella colonna ascendente di gas, praticamente costante su tutto il letto fluido. Questa caratteristica, unitamente al buon grado di agitazione presente all'interno del reattore, fa sì che la velocità di reazione sia particolarmente elevata con conseguenti tempi di residenza della biomassa nel gassificatore estremamente brevi.

I reattori BFB, nei quali è possibile introdurre anche opportuni agenti catalitici per favorire il cracking dei tar o modificare la composizione finale del syngas prodotto, sono generalmente alimentabili con diverse tipologie di biomassa anche di diverse dimensioni granulometriche. A questa estrema flessibilità in termini di pezzatura e composizione della carica, si aggiungono la facilità di accensione e spegnimento del reattore e la sua elevata capacità volumetrica (10–15 t/h di biomassa secca); di contro va invece segnalata la presenza di carboni nelle ceneri e l'alta temperatura del gas prodotto, sintomi entrambi di una efficienza di conversione non particolarmente elevata.

### 3.9.2 Gassificatori a letto fluido circolante (CFB)

Nei gassificatori a letto fluido circolante la maggiore velocità dell'agente gassificante fa compiere alle particelle un moto rotatorio attraverso le varie parti che lo compongono.

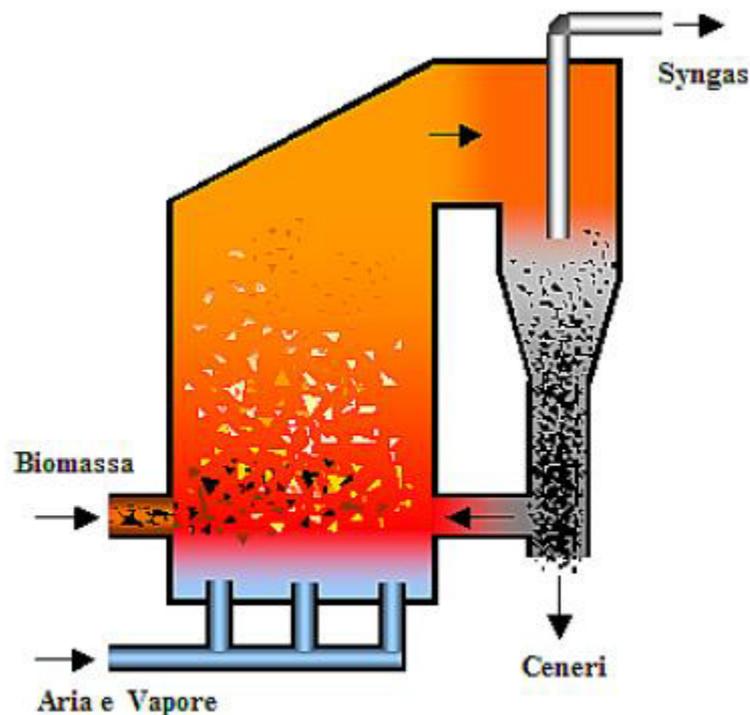


Figura 3.0.17 Schema gassificatore a letto fluido circolante (CFB)

In questi impianti il reattore si sviluppa soprattutto in altezza arrivando sino a 8 metri; il diametro invece, a differenza dei sistemi a letto fluido, risulta abbastanza limitato, mentre molto più elevata è la velocità di fluidizzazione che supera i 4 m/s fino a 7-8 m/s.

Tutto ciò fa sì che le particelle solide (char ed eventualmente materiale inerte) vengano trascinate in sospensione fino addirittura ad uscire dalla colonna principale del reattore che pertanto è affiancato, nella parte sommitale, da un ciclone che separa dai gas tali componenti. Quest'ultime, a loro volta, vengono reintrodotti, tramite un apposito condotto, alla base del gassificatore: da qui appunto il nome di letto circolante.

Il combustibile viene inserito nella parte inferiore del corpo del gassificatore, ad una certa distanza al di sopra della griglia di distribuzione dell'aria.

Una volta all'interno, le particelle di biomassa cominciano a disidratarsi per poi subire in modo abbastanza rapido il processo di pirolisi.

Da questo, come noto, si sviluppa sia una componente gassosa, che si muove verso la parte superiore del reattore, che una frazione carbonizzata che in parte rimane all'interno del letto e in parte viene trascinata dai gas e dagli altri elementi circolanti verso il filtro a ciclone.

Dopo la separazione, i char trattenuti vengono come visto rimandati nel gassificatore dove, per mezzo dell'aria (o dell'ossigeno) insufflata, avviene la loro parziale ossidazione e la successiva riduzione con formazione dei principali componenti del syngas.

Nella colonna principale del reattore si possono allora distinguere, a partire dal basso, tre zone differenti:

- fase densa, caratterizzata da una elevata densità e dalla formazione di bolle di gas che tendono a salire in superficie;
- fase intermedia, dove il flusso delle particelle solide si manifesta creando delle nuvole a diversa densità in cui si crea un fenomeno di instabilità analogo a quello della formazione delle bolle;
- fase diluita, in cui la miscelazione del solido nel gas è ormai omogenea e la densità risulta minore.

In questa tipologia di gassificatori non esiste dunque, come accade nei sistemi BFB, il pelo libero del letto fluido o una zona costituita dalla sola fase gassosa; questa infatti, per tutta l'altezza del reattore, risulta miscelata alla componente solida che tende ad addensarsi maggiormente negli strati bassi solamente per effetto della gravità.

Diverse sperimentazioni sono state eseguite utilizzando ossigeno come fattore gassificante con discreti risultati.

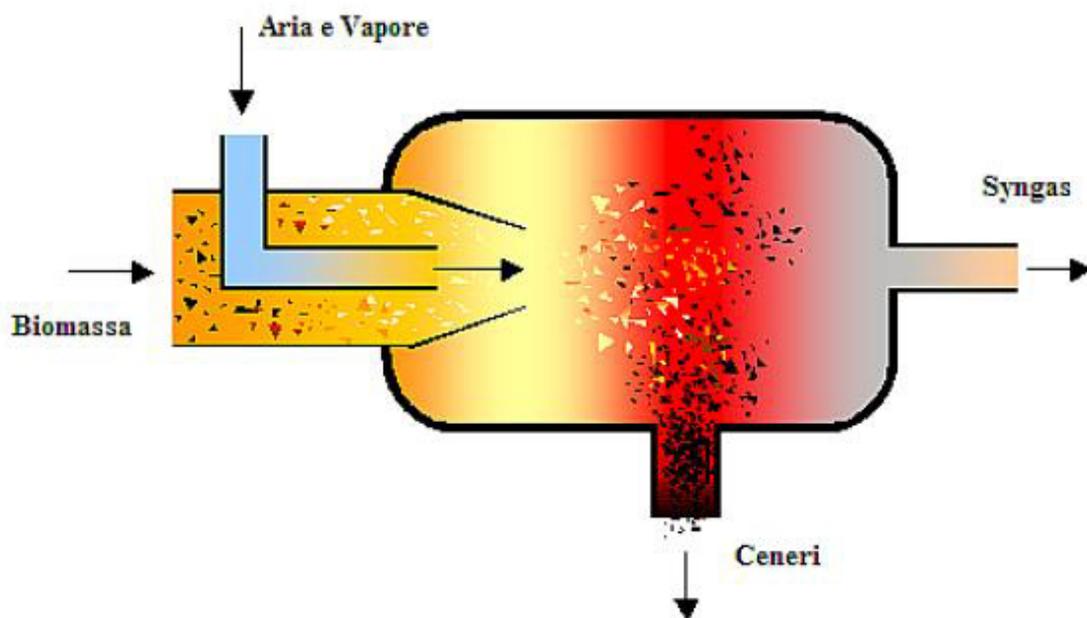
Agente ossidante	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	Contenuto ceneri
OSSIGENO	57	26,3	12,3	1,7	2,7	Medio

**Tabella 3.0.7** Composizione media percentuale syngas da gassificatore CFB

I gassificatori a letto fluido circolante, specialmente quelli atmosferici, sono adatti ad una grande varietà di biomasse; le portate di alimentazione sono maggiori alle 15 t/h, mentre le taglie vanno dai pochi MWt fino a circa 100 MWt e non è pregiudicata la possibilità di realizzare sistemi CFB con potenze anche maggiori.

### 3.9.3 Gassificatori a letto fluido trascinato

I gassificatori a letto fluido trascinato non hanno al loro interno un materiale inerte fluidificante e operano con il combustibile e l'agente gassificante in equicorrente.



**Figura 3.0.18** Schema gassificatore a letto fluido trascinato

La caratteristica principale di questi sistemi è quella di avere temperature operative molto alte, superiori anche ai 1.200 °C, che permettono di ottenere un syngas con contenuto di tar pressoché nullo.

Per la realizzazione del processo è richiesta una biomassa di dimensioni molto fini per facilitare lo spostamento e il trasporto nel gas.

Per quanto riguarda le ceneri poi, queste, con un simile regime termico, tendono a raggiungere lo stato liquido e ciò di fatto consente di realizzare una loro più facile rimozione. Appare evidente dunque che questa categoria di gassificatori è particolarmente indicata proprio per il trattamento delle biomasse, fermo restando comunque che a causa dei sofisticati dispositivi di controllo, molto onerosi dal punto di vista economico, l'utilizzo di questa tecnologia si giustifica solamente in impianti di grande scala.

Tipicamente l'agente ossidante impiegato è ossigeno puro o vapore acqueo surriscaldato, cosa che comporta costi superiori rispetto ad un sistema BFB o CFB classici.

### 3.10 Tabella riassuntiva dei vari gassificatori

TIPOLOGIA	VANTAGGI	SVANTAGGI
<b>Gassificatore a letto fisso controcorrente Updraft</b>	<p>semplicità;</p> <p>possibilità di operare con diversi tipologie di biomasse (paglia, segatura, legname, etc.);</p> <p>elevata combustione del carbone di legna e scambio termico del gas in uscita con la biomassa in ingresso;</p> <p>elevato rendimento di impianto.</p>	<p>formazione di cammini preferenziali interni al gassificatore che portano a situazioni di pericolo a causa della ritenzione di ossigeno all'interno del letto fisso e quindi necessità di installare delle grate mobili;</p> <p>ritenzione dei catrami all'interno del gas;</p>
<b>Gassificatore a letto fisso equicorrente Downdraft</b>	<p>produzione di gas senza contenuto di catrami e quindi adatto per alimentazioni di motori endotermici;</p> <p>basso impatto ambientale a causa del basso livello di composti organici nel condensato.</p>	<p>La biomassa deve essere pellettizzata o bricchettata prima dell'uso;</p> <p>A causa della necessità di mantenere uniforme elevate temperature sopra un data area rende impraticabile l'uso di questo tipo di gassificatori per potenze all'albero superiori ai 350 kW.</p>

<b>TIPOLOGIA</b>	<b>VANTAGGI</b>	<b>SVANTAGGI</b>
<b>Gassificatore a letto fisso cross-draft</b>	Realizzazione di gassificatori operanti su piccola scala di potenza (potenze all'albero inferiori a 10 kW) in quanto utilizza un semplice sistema di trattamento dei gas (ciclone o filtro).	Minima capacità di conversione dei catrami in idrocarburi leggeri che ha come conseguenza la necessità di utilizzare combustibili di buona qualità.
<b>Gassificatore a letto fluido (BFB, CFB)</b>	Applicabile a grande scala (maggiore di 500 kW all'albero);  Elevati coefficienti di scambio termico;  Elevate velocità di reazione;  Temperature uniformi.	Elevata produzione di particolato;  Richiede pezzatura fine della biomassa combustibile;  Tecnologia complessa;  Possibile presenza di carbone nelle ceneri.
<b>Gassificatore a letto trascinato</b>	Applicabile a grande scala;  Grande versatilità;  Bassa produzione di catrami;  Completa conversione del carbonio.	Elevata produzione di scorie;  Richiede combustibile fine;  Tecnologia complessa;  Elevati costi di gestione.

**Tabella 3.0.8** Vantaggi e svantaggi delle tipologie di gassificatori



## 4. LCA: “*life cycle assessment*”

---

LCA è l’acronimo di *Life Cycle Assessment* che in italiano viene tradotto con l’espressione valutazione del ciclo di vita.

L’obiettivo di questo strumento a supporto delle decisioni è quello di seguire un prodotto, un processo, un’attività o una gestione durante tutte le fasi della sua esistenza allo scopo di identificare gli effetti che produce sull’ambiente.

Questo strumento permette di gestire in modo trasparente l’analisi del sistema oggetto di studio e di comprendere, ripercorrere ed eventualmente criticare l’iter che ha portato a determinate conclusioni.

### 4.1 Lo sviluppo sostenibile

Uno sviluppo si dice sostenibile se soddisfa le esigenze di tutti i paesi e i gruppi di popolazioni dell’odierna generazione, senza compromettere la possibilità a future generazioni di soddisfare le proprie esigenze.

Uno sviluppo degno del termine ‘sostenibile’ garantisce il mantenimento della molteplicità della natura (animali e piante) (Conferenza di Rio, 1992).

Uno dei problemi più gravi che la società umana si trova a dover fronteggiare è quello di trovare un giusto equilibrio tra la salvaguardia dell’ambiente e i vantaggi che derivano dall’utilizzo e dallo sfruttamento della tecnologia.

Negli ultimi duecento anni il nostro pianeta ha subito modificazioni molto rilevanti ad opera dell’uomo: verso la fine degli anni Ottanta, per la prima volta nella storia dell’umanità, la richiesta di risorse naturali ha superato le capacità di rigenerazione della Terra, determinando uno squilibrio che impedisce alla biosfera di rigenerarsi allo stesso ritmo con la quale viene consumata.

Tale percentuale di “consumo” è andata aumentando fino a superare, nel 1999, il valore del 120%: in termini concreti per far rinascere ciò che gli esseri umani consumano in un anno non bastano più dodici mesi, ma ne occorrono quindici circa.

La consapevolezza che ciascuna attività umana comporta una alterazione del fragile equilibrio del pianeta ad un livello molto complesso ha indotto a spostare l’analisi dei rischi dovuti allo sviluppo tecnologico su una base molto più ampia.

La produzione di energia necessaria a soddisfare esigenze in aumento, i processi di urbanizzazione che interessano quote di popolazione sempre maggiori, lo sviluppo dell'agricoltura indispensabile a soddisfare le crescenti esigenze alimentari, uno standard di vita sempre più elevato e molti altri fattori collegati alla crescita demografica e allo sviluppo tecnologico concorrono ad originare tutti i più importanti e gravi problemi ambientali del nostro pianeta.

Le attività e le tecnologie sopra accennate sono dunque solo alcuni esempi di cause di impatto ambientale, che si manifesta in varie forme ed in diverse scale. Tra i principali tipi di impatto ricordiamo:

- l'inquinamento dell'aria, dovuto principalmente ai processi di combustione utilizzati per la produzione di energia;
- l'inquinamento chimico e biologico delle acque, causato in massima parte dagli scarichi urbani, industriali, agricoli e zootecnici;
- l'inquinamento da rumore, particolarmente importante nei centri urbani ed in prossimità di aeroporti e vie di comunicazione;
- gli effetti sul paesaggio e sull'assetto del territorio dovuti alla realizzazione di grandi impianti industriali ed energetici, alla costruzione di infrastrutture quali porti, aeroporti, ferrovie ed autostrade;
- gli effetti sanitari ed ambientali, dovuti ad incidenti che possono verificarsi in impianti a rischio rilevante, quali centrali nucleari, impianti idroelettrici, impianti chimici.

Gli effetti ambientali elencati hanno la caratteristica comune di poter essere quantificati. Ciò rende possibile l'uso di metodi scientifici per poterne valutare l'entità.

Esistono numerosi altri tipi di impatto, quali gli effetti globali (effetto serra, piogge acide) e gli effetti sugli equilibri degli ecosistemi, che non sono o sono solo parzialmente quantificabili e che pertanto vanno analizzati con approcci che, a seconda dei casi, potranno essere empirici, conservativi, semiquantitativi o semplicemente dettati da esigenze di accettabilità pubblica.

#### **4.1.1 Il concetto di impatto ambientale**

Il termine "impatto" così come viene concepito nella terminologia ambientale, possiede un significato metaforicamente vicino a ciò che si intende nel linguaggio comune: un contatto violento tra due oggetti che entrano in collisione.

Si identificano, infatti, anche in campo ambientale, due elementi che concorrono a determinare l'impatto: la causa, che rappresenta idealmente il proiettile, e l'ambiente, che raffigura il bersaglio dell'urto.

Una definizione generale di impatto ambientale potrebbe essere la seguente: *Per impatto ambientale si intende l'insieme di tutti gli effetti, positivi e negativi, diretti ed indiretti, temporanei e permanenti, che ciascuna azione umana genera sull'ambiente, inteso come sistema complesso delle risorse umane e naturali.*

Come si può osservare dalla definizione, gli impatti sono assai numerosi, non solo per la molteplicità dei soggetti che li producono e degli oggetti che li subiscono, ma anche per le condizioni nelle quali si verificano.

Aspetti spesso trascurati riguardano il fatto che non tutte le conseguenze, e quindi gli impatti, derivanti da un'azione umana siano necessariamente negativi per l'ambiente o comunque duraturi nel tempo.

Sulla base di queste considerazioni, seppure generiche, si può già comprendere come l'analisi di impatto ambientale sia un processo assai complesso ed articolato, che richiede un approccio fortemente interdisciplinare.

## **4.2 L'analisi del ciclo di vita**

Negli ultimi anni è maturata l'attenzione nei confronti di problematiche di carattere ambientale, in particolare è aumentato l'interesse nello sviluppo di metodi e tecniche che permettano di comprendere, valutare e conseguentemente ridurre i possibili impatti sia dei prodotti realizzati, sia di quelli che una volta utilizzati esauriscono la loro vita operativa e devono essere smaltiti.

Anche nell'ottica industriale la questione ambientale sta cominciando a diventare sempre più rilevante, basti pensare che fino a pochi anni fa i problemi relativi alla compatibilità ambientale delle attività produttive venivano fortemente sottovalutati, ciò era dovuto al fatto che l'impresa ne percepiva soprattutto gli aspetti antieconomici ma, soprattutto, mancavano le normative capaci di incidere in maniera significativa sul mercato e sulla concorrenza, stimolando le aziende ad un rinnovamento tecnologico in vista di restrizioni sempre più severe.

La diffusione di una “coscienza ambientale” a tutti i livelli della società, l’esistenza di una crescente domanda di prodotti ecocompatibili da parte dei consumatori e quindi di una nuova attraente possibilità di sviluppo per le imprese, l’entrata in vigore di normative europee e una crescente capacità di controllo degli apparati tecnico - amministrativi preposti, hanno aperto un nuovo scenario centrato sulla compatibilità tra industria e ambiente, che può essere definito come “Sviluppo Sostenibile” applicato alla realtà d’impresa.

Le grandi industrie, così come le aziende di dimensioni più ridotte, si stanno adeguando all’obiettivo dell’Eco-efficienza che, di fatto, si trova sempre più a coincidere con quello della Qualità Totale.

Il perseguimento di questi obiettivi comporterà un nuovo modo di procedere all’interno delle aziende: il progetto e la creazione di nuovi prodotti sarà accompagnato dalla valutazione del loro “Ciclo di Vita”.

Fino ad oggi si sono sviluppate diverse metodologie per l’analisi del LCA: la standardizzazione di questi metodi è stata compiuta da “SETAC” (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, [1993]) e da “ISO” (International Standard Organisation): quest’ultima ha definito ed emanato una norma che offre riferimenti per la corretta applicazione dell’analisi del ciclo di vita (norma europea UNI EN ISO 14040, approvata dal CEN, Comitato Europeo di Normazione, il 29 giugno 1997).

La definizione proposta dalla SETAC per l’LCA è la seguente: *L’LCA è un processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, attraverso l’identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell’ambiente e l’identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti.*

*L’analisi riguarda l’intero ciclo di vita del prodotto (“dalla culla alla tomba”): dall’estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e alla collocazione finale del prodotto dopo l’uso.*

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

L'affermarsi dell'LCA è, quindi, in qualche modo, l'effetto simultaneo di tre eventi:

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

Il metodo offre numerose possibilità di utilizzo, tra le quali:

- La valutazione dell'impatto ambientale di prodotti differenti aventi la stessa funzione.
- L'identificazione dei momenti più significativi dal punto di vista dell'impatto ambientale all'interno del ciclo produttivo o del ciclo di vita del prodotto. Si indicano in questo modo i principali percorsi verso possibili miglioramenti dei cicli produttivi e dei prodotti già esistenti intervenendo ad esempio sulla scelta dei materiali, delle tecnologie e degli imballaggi.
- Il sostegno alla progettazione di nuovi prodotti.
- La segnalazione di direzioni strategiche per lo sviluppo, che consentano risparmi sia per l'azienda sia per il consumatore.
- La dimostrazione di aver ottenuto un ridotto impatto ambientale ai fini dell'attribuzione del marchio ecologico comunitario (Ecolabel).
- La persecuzione di strategie di marketing in relazione al possesso di Ecolabel.
- L'ottenimento, dove possibile, di un eventuale risparmio energetico.
- Il sostegno nella scelta degli investimenti dei procedimenti per il disinquinamento.
- Il supporto nella scelta delle soluzioni più efficaci e idonee per il trattamento dei rifiuti.
- La base oggettiva di informazioni e di lavoro per l'elaborazione dei regolamenti che riguardano l'ambiente.

L'LCA non è quindi solo un mezzo per la salvaguardia dell'ambiente, esso può infatti diventare un importante strumento per il rafforzamento delle dinamiche competitive e di riduzione e controllo dei costi.

Inevitabilmente, nella stesura della metodologia, sarà necessario trovare dei compromessi tra rigore scientifico e semplicità, per cui il tipo di informazione che viene fornito sarà un indicatore di tipo semplificato, specialmente per quanto riguarda la valutazione dell'impatto ambientale.

In altre parole, l'LCA non deve essere considerato un metodo in grado di fornire risultati completi e pienamente esaustivi, poiché fa uso di valutazioni di carattere soggettivo, soprattutto laddove si ha mancanza di informazioni più rigorose.

Per far sì che, mediante l'utilizzo dell'LCA, si riesca ad ottenere una comprensione adeguata dell'impatto ambientale dei prodotti è necessario, infatti, fare in modo che tale strumento mantenga caratteristiche di flessibilità ed efficienza di costo: questo ne permette l'utilizzo diffuso anche in realtà industriali di piccole e medie dimensioni.

Lo scopo, i confini ed il livello di dettaglio di un LCA dipendono dall'oggetto dello studio e dall'uso che se ne vuole fare, tuttavia, sebbene la profondità e l'ampiezza dell'indagine possano variare molto a seconda dei casi, lo schema a cui si fa riferimento rimane sempre lo stesso.

D'altra parte ogni tecnica di valutazione presenta necessariamente delle limitazioni, che occorre conoscere e tenere in adeguata considerazione durante l'utilizzo, in particolare:

- La natura delle scelte e delle assunzioni fatte nell'LCA può essere soggettiva.
- I modelli utilizzati per l'analisi inventariale o per valutare impatti ambientali sono limitati dalle assunzioni che sono implicitamente contenute in esso: tali modelli potrebbero non essere disponibili per tutte le applicazioni.
- I risultati di uno studio di LCA focalizzati su questioni globali o regionali potrebbero non essere adeguate per applicazioni maggiormente circoscritte.
- L'accuratezza di uno studio di LCA può essere limitata dall'accessibilità o dalla disponibilità di informazioni rilevanti o di qualità elevata.
- La mancanza di una dimensione spaziale e temporale nell'"*inventory*" dei dati utilizzati per la valutazione dell'impatto introduce incertezza sui risultati dell'impatto.
- Essendo un modello scientifico è per sua natura una semplificazione di un sistema fisico ovvero non è possibile un'assoluta e completa rappresentazione di ogni effetto sull'ambiente.

In generale, le informazioni ottenute attraverso uno studio di LCA dovrebbero essere usate come parte di un processo decisionale molto più completo e utilizzate per comprendere gli

scambi globali o generali. Confrontare i risultati di differenti studi di LCA, è possibile solamente se le assunzioni e il contesto di ciascuno studio sono i medesimi.

#### **4.2.1 Cenni storici**

Il metodo dell'LCA si è conquistato ormai un ruolo determinante e, nonostante l'attenzione ad esso rivolta sia piuttosto recente, le sue origini vanno ricercate agli inizi degli anni Sessanta. La relazione di Harold Smith alla World Energy Conference del 1963, riguardante le richieste di energia per la produzione di intermedi chimici, si può considerare uno dei primi esempi della metodologia, seppure la valutazione degli impatti sull'ambiente fosse ancora marginale. Verso la fine degli anni Sessanta furono pubblicati alcuni studi di modelli globali in "The Limits to Growth" (Meadows et al., [1972]) nei quali si cercava di predire quali sarebbero stati gli effetti di un aumento della popolazione mondiale sulla richiesta di materie prime e di energia.

La prospettiva di un rapido esaurimento dei combustibili fossili e di eventuali modifiche climatiche, da attribuire soprattutto all'eccesso di calore immesso nell'atmosfera da parte dei processi di combustione, spinsero verso calcoli meticolosi sui consumi energetici e sui rifiuti termici delle industrie.

In quel periodo furono compilati una dozzina di studi che stimavano i costi e le conseguenze ambientali di risorse energetiche alternative.

Nel 1969, un gruppo di ricercatori del Midwest Research Institute (MRI) condusse uno studio per conto della Coca-Cola confrontando diversi tipi di contenitori per le bevande, con lo scopo di determinare quale fosse l'involucro con il minor impatto sull'ambiente in termini di emissioni e di consumo di materie prime. Il calcolo fu realizzato quantificando le materie prime, il combustibile e i rilasci nell'ambiente per la produzione di ogni singolo contenitore. La procedura fu denominata Resource and Environmental Profile Analysis (REPA).

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

L'interesse per l'LCA aumentò negli anni Ottanta con lo sviluppo di una serie di metodi per la valutazione quantitativa degli impatti riguardo a differenti tematiche ambientali (impoverimento delle risorse, riscaldamento globale, ecc.), in questo modo gli studi di LCA si diffusero divenendo sempre più trasparenti e disponibili al pubblico.

Alla fine degli anni Ottanta permaneva, tuttavia, una situazione d'enorme confusione: rapporti

riguardanti LCA condotti sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti.

Il motivo di ciò è da attribuire alla scarsa uniformazione delle valutazioni, per cui gli studi effettuati si basavano su dati, metodi e terminologie fra di loro differenti.

Divenne presto evidente la necessità di una metodologia univoca e standardizzata. Il dibattito scientifico fu portato avanti sotto il patrocinio della SETAC e uno dei risultati più importanti fu la pubblicazione di un quadro di riferimento internazionalmente accettato (SETAC, 1993).

Attualmente la maturità e l'unificazione della metodologia sono testimoniate dall'emissione, da parte dell'ISO (International Standards Organization) e segnatamente del suo Technical Committee 207 (TC207), della normativa tecnica della serie ISO 14040 *Valutazione del Ciclo di Vita*, la quale copre numerosi aspetti della gestione ambientale d'impresa, incontrando le esigenze espresse dalle aziende, dai governi, dalle organizzazioni non governative (ONG) e dai consumatori stessi.

## 4.3 La struttura di una LCA

Da un punto di vista metodologico, la definizione di LCA proposta originariamente dalla SETAC, successivamente ripresa dalle norme ISO 14040 e 14044<sup>4</sup>, e qui leggermente modificata è la seguente: *“una LCA è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi a un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”*.

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

---

<sup>4</sup> UNI EN ISO 14040:2006 e UNI EN ISO 14044:2006, costituiscono la revisione tecnica complessiva delle norme sull'LCA (UNI EN ISO 14040, UNI EN ISO 14041, UNI EN ISO 14042, UNI EN ISO 14043), che sono state accorpate in due sole norme. La UNI EN ISO 14040 contenente i principi ed il quadro di riferimento, e la UNI EN ISO 14044 contenente requisiti e linee guida.

Una LCA applicata a un sistema industriale indirizza dunque lo studio di efficienza del sistema in oggetto verso la salvaguardia della salute dell'ambiente e dell'uomo nonché verso il risparmio delle risorse

Punto fondamentale della teoria è la definizione di “sistema industriale”, che la norma ISO qualifica come “sistema di prodotti”.

La differenza tra questi due modi di intendere il sistema oggetto di uno studio di LCA risiede principalmente nella visione sostanzialmente diversa tra coloro che intendono la LCA come analisi di processo e quelli che la intendono come analisi di prodotto.

Per chiarire meglio questa differenza, sottile solo in apparenza, è bene ricordare che con sistema industriale si intende un insieme di procedure, la cui funzione principale è la produzione di beni utili; esso è separato dal sistema ambiente da confini fisici ben definiti ed è a esso collegato grazie allo scambio di input e di output.



**Figura 4.0.1** Rappresentazione schematica dell'interazione tra un sistema industriale e il sistema ambiente

In quest'ottica, l'ambiente non è quindi quello naturale definito dall'ecologia, ma è tutto ciò che sta all'esterno del sistema industriale considerato.

Secondo questa impostazione risulta chiaro come gli input del sistema siano parametri che intervengono nel dibattito sui problemi di risparmio delle risorse, mentre gli output riguardino i problemi di inquinamento.

Già da questa prima descrizione si comprende come la definizione della funzione del sistema industriale e dei confini dello stesso rappresentino due tra le operazioni chiave per la buona riuscita di uno studio di LCA.

È allora logico affermare che, più che descrivere il prodotto, una LCA descrive il sistema che lo genera o, in altre parole, la funzione del sistema stesso.

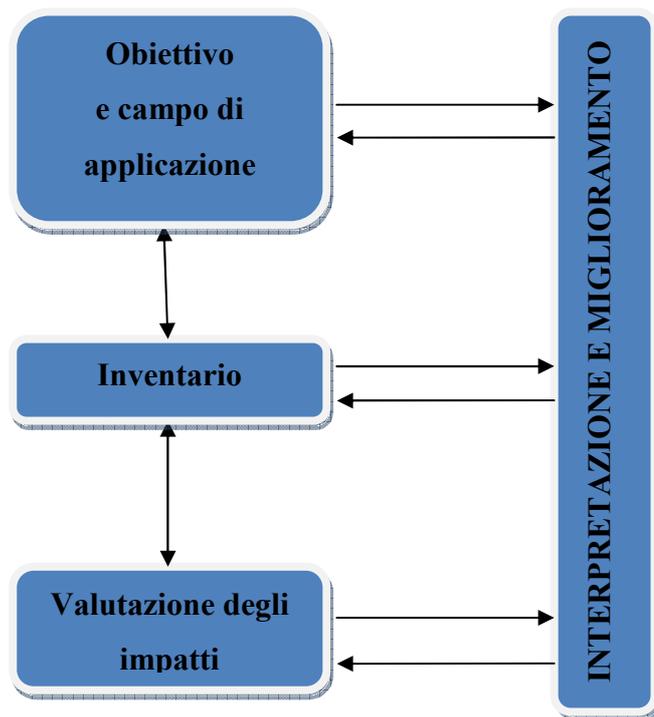
Le norme ISO parlano allora di *Product system* per indicare “l’insieme elementare di unità di processo connesse tra loro per quanto riguarda materia e energia, che perseguono una o più funzioni definite” e , pertanto, per porre un forte accento sull’importanza dei prodotti all’interno di un qualunque sistema di processi o di servizi.

Il modello analogico del sistema oggetto di indagine in una LCA risulta sempre essere una semplificazione della realtà, poiché, come tutti i modelli operativi non include una rappresentazione completa delle interazioni con l’ambiente ma solamente quelle ritenute più significative.

La struttura moderna della LCA proposta dalla norma ISO 14040 è sintetizzabile in quattro momenti principali:

- 1) Definizione degli scopi e degli obiettivi (*Goal and Scope Definition*): è la fase preliminare in cui vengono definite le finalità dello studio, l’unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l’affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
- 2) Analisi di Inventario (*Life Cycle Inventory Analysis, LCI*): è la parte del lavoro dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività; lo scopo principale è quello di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell’energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto. Redigere un inventario di ciclo di ciclo vita significa pertanto costruire il modello analogico del sistema reale che si intende studiare.
- 3) Analisi degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*): è lo studio dell’impatto ambientale provocato dal processo o attività, che ha lo scopo di evidenziare l’entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell’ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell’inventario. È questa la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale.
- 4) Interpretazione e Miglioramento (*Life Cycle Interpretation*): è la parte conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l’impatto ambientale dei processi o attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA in modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto.

Questi diversi momenti di analisi costituiranno il punto di riferimento per gli interventi su un processo di produzione esistente o per il progetto di un nuovo prodotto.



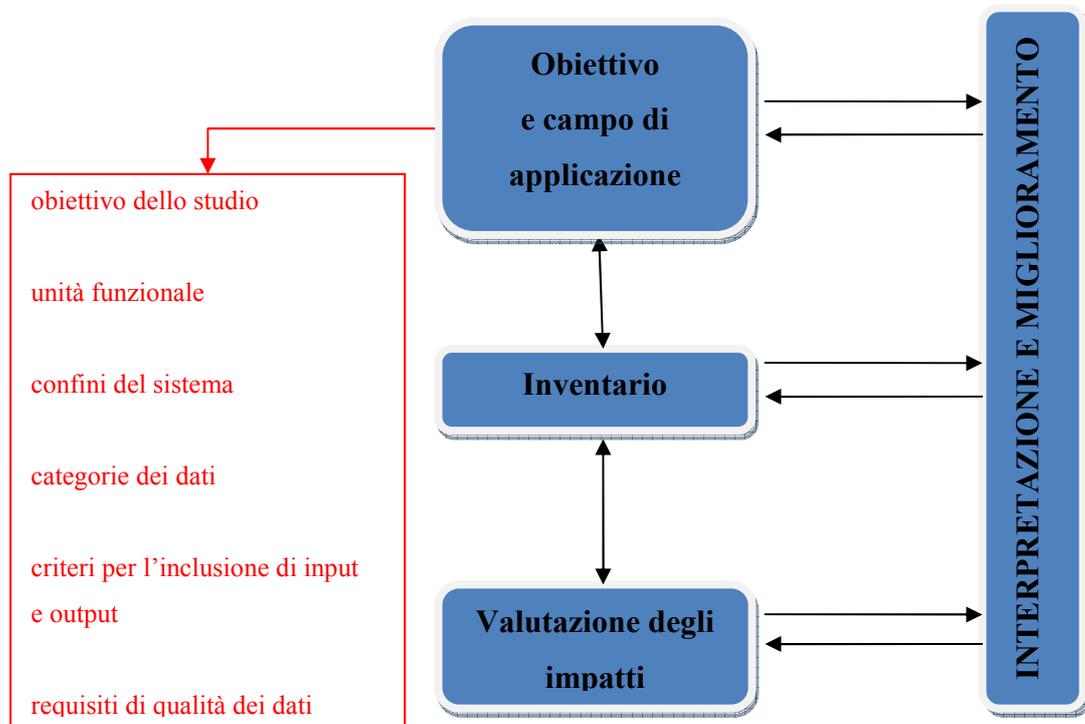
**Figura 4.0.2** La struttura della LCA proposta dalla ISO 14040

Prima di illustrare nel dettaglio le varie fasi elencate, occorre ripetere che l'approccio metodologico è per sua natura di tipo dinamico e iterativo e, come si intuisce, la parte fondamentale è quella della disponibilità dei dati e delle informazioni necessarie allo sviluppo dei calcoli. Man mano che si approfondisce l'analisi, nuovi dati potranno poi sostituire o aggiornare i vecchi, richiedendo la revisione dei calcoli stessi.

Osserviamo infine che, data la gran mole di dati in gioco e per soddisfare le esigenze di ciclicità dell'analisi, in ogni caso, per l'elaborazione dei dati è indispensabile utilizzare strumenti di tipo informatico. Gli specifici modelli informatici di analisi e le banche dati presenti oggi sul mercato costituiscono, quindi, parte integrante della strumentazione necessaria per affrontare una LCA.

### 4.3.1 Prima fase di una LCA: definizione degli scopi e degli obiettivi

Una LCA deve essere necessariamente preceduta da un'esplicita dichiarazione degli obiettivi e delle finalità dello studio.



**Figura 4.0.3** La fase di “definizione degli scopi e degli obiettivi” di una LCA

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

Tra le caratteristiche fondamentali di una LCA fortemente dipendenti dalle finalità è possibile citare: l'ampiezza del ciclo di vita, le eventuali alternative da considerare, l'integrazione con aspetti non ambientali, la qualità e affidabilità dei dati a disposizione, la scelta dei parametri ambientali con cui riassumere i risultati, l'estensione della fase di valutazione e di miglioramento, il livello di dettaglio a cui arrivare.

In generale è possibile ricondurre il campo di applicazione di uno studio LCA alle seguenti finalità:

- Ricerca e sviluppo;
- *Green marketing* (etichettatura ecologica, comunicazione ambientale ecc.);
- Supporto nei sistemi di gestione ambientale (per appoggiare azioni di miglioramento della “filiera”);
- *Eco design* (progettazione ecocompatibile).

Anche se, tipicamente, quando un’organizzazione si avvicina a questo tema è usuale un approccio per fasi successive, a partire dalla pianificazione delle attività o dall’individuazione dell’obiettivo finale dell’applicazione, si è in grado da subito di ricondurre il caso in oggetto a una delle categorie elencate, e quindi di stabilire alcuni tra i parametri più significativi per definire la strategia complessiva utile ad affrontare lo studio.

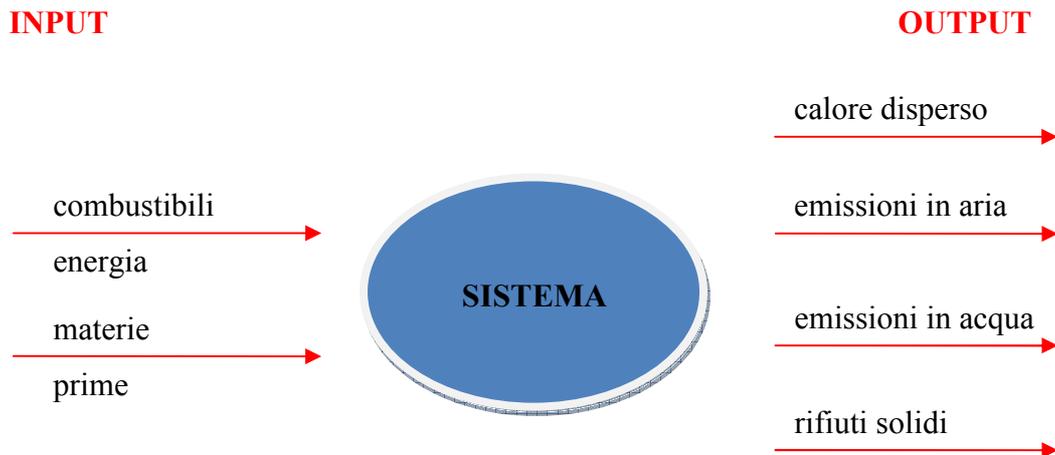
Una strategia preliminare è pertanto particolarmente gradita poiché consente di definire i confini della ricerca e quindi quelli del sistema oggetto dello studio, nonché di esprimere i risultati in maniera opportuna. In ultima analisi, risiede probabilmente nella gestione delle risorse a disposizione una delle variabili più influenti nella definizione del grado di approfondimento cui spingere lo studio.

#### *4.3.1.1 Definizione del sistema*

Nell’ottica LCA si è visto che viene definito “sistema” un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più precise operazioni industriali aventi una determinata funzione; esso è delimitato da appropriati confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input e output.

Si cominci dal caso più generale possibile di un sistema industriale di tipo globale, intendendo con questo un sistema i cui input consistono tutti in materie prime e in energia primaria e i cui output in reflui che ritornano al sistema ambiente (o biosfera).

Si tratta di un sistema al cui interno sono presenti tutti i protagonisti dei processi di trasformazione intesi in senso lato: dai produttori agli utenti, attraverso i prodotti finali.



**Figura 4.0.4** Il sistema di ciclo di vita in senso lato

È questo il caso in cui si è anche soliti parlare di “sistema reale di ciclo di vita” poiché tra i suoi output non esistono prodotti utili ma solo sostanza reflue.

Come evidenziato in precedenza, tali sistemi contengono un gran numero di operazioni collegate tra loro, anche in modo molto complesso, dai flussi di materiali, di energia e di prodotti finali.

Per effettuare un inventario di ciclo di vita di un sistema di questo genere è pertanto necessario definire in primo luogo le singole operazioni che lo compongono in qualità di “operazioni unitarie”: ognuna di queste operazioni unitarie riceve i propri input dalle operazioni unitarie a monte, mentre i suoi output serviranno ad alimentare quelle seguenti, secondo l’effettivo schema di produzione. Anche se più difficile da immaginare, è bene comprendere come questo schema non sia lineare ma funzioni in modalità di network, in grado cioè di scambiare massa ed energia con gli altri componenti del sistema in maniera interdependente.

Questo è importante perché ci permette di studiare parti del sistema globale cioè sottoinsiemi produttivi. L’analisi di un singolo sottoinsieme viene definita “eco-bilancio”.

L’eco-bilancio differisce dalla LCA essenzialmente per i confini del sistema indagato. La LCA è allora un insieme di eco-bilanci collegati tra di loro.

#### 4.3.1.2 Definizione dell'unità funzionale

È importante definire, fin dall'inizio dello studio, un'unità di misura di riferimento, chiamata "unità funzionale", con cui trattare ed esporre i dati e le informazioni di una LCA.

Secondo la norma ISO 14040: *"l'unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita in funzione del sistema prodotto. Lo scopo principale dell'unità funzionale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata e in uscita. Questo riferimento è necessario per consentire la compatibilità dei risultati di una LCA. Tale compatibilità è particolarmente critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che i confronti siano fatti su una base analoga. Un sistema può avere un gran numero di funzioni possibili e la funzione scelta per lo studio dipende dall'obiettivo e dal campo di applicazione. La corrispondente unità funzionale deve essere definita e misurabile"*.

La sua definizione risulta quindi fondamentale sia per la buona riuscita dello studio, sia per una migliore comprensione delle informazioni che lo studio è in grado di fornire. Questa unità è stata creata anche perché le unità di misura normalmente utilizzate, come la massa, il numero di pezzi, il volume ecc. non sono sempre adeguate a rappresentare il rendimento (energetico e ambientale) di un processo produttivo, ma anche perché risultati uguali di uno studio espressi secondo unità funzionali differenti possono portare a conclusioni completamente diverse.

Poiché i sistemi studiati contengono molte unità di processo, risulta comodo utilizzare unità funzionali di processo diverse a seconda del sottosistema considerato, per poi far convergere i valori utilizzando l'unità funzionale scelta come rappresentativa dell'intero sistema indagato.

Per chiarire ulteriormente le cose, a fianco dell'unità funzionale, la norma ISO 14040 introduce il concetto di "flusso di riferimento" (*reference flow*). Tale flusso di riferimento è in pratica la quantità di bene o di servizio necessario per ottenere l'unità funzionale scelta.

#### 4.3.1.3 I confini del sistema

Per quanto riguarda i confini della ricerca, questi vengono definiti con un'operazione che richiede grande cura e attenzione.

Tale definizione avviene a seguito di una minuziosa descrizione del sistema in esame e della costruzione del diagramma di flusso del ciclo produttivo, effettuate allo scopo di pianificare la raccolta dei dati e delle informazioni, delineando praticamente in tal modo il campo di azione. Una prima delimitazione dei confini verrà effettuata con criteri sia geografici sia tecnologici, comprendendo cioè nell'ambito della ricerca gli ambienti fisici e i processi produttivi che si ritiene di dover considerare per l'analisi.

Successivamente, man mano che lo studio prenderà corpo, sarà possibile escludere componenti che si dimostreranno non rilevanti o per cui risulta troppo oneroso ottenere informazioni dettagliate, oppure includerne altre alle quali inizialmente non si era attribuita un'adeguata importanza.

Tenuto conto di queste considerazioni, è possibile ribadire che di fatto ogni LCA contiene delle semplificazioni e limitazioni che la rendono gestibile rispetto a una LCA completa del sistema industriale globale, che per ovvie ragioni non sarà mai riproducibile per intero.

È bene ribadire dunque che l'obiettivo iniziale di una LCA è quello di ripercorrere a ritroso tutte le filiere produttive del sistema indagato fino all'estrazione delle materie prime nella maniera più completa possibile e stimare l'errore che si compie trascurando particolari unità di processo.

Anche il periodo di riferimento (*temporal boundaries*) costituisce un vincolo nella scelta dei confini dell'analisi: i dati devono essere pertanto raccolti in un periodo di tempo ben definito.

Tutte queste informazioni, che vanno a costituire le fondamenta preliminari su cui impostare l'intera analisi, vengono raggruppate, secondo la ISO 14040, nel cosiddetto "campo di applicazione dello studio", che rappresenta pertanto una sorta di carta d'identità con i requisiti, i limiti e le ipotesi iniziali con cui l'analista intende affrontare la ricerca.

Per quanto riguarda, infine, l'intersezione della sfera energetica e ambientale con la sfera economica, è accettato il fatto di ritenere non appropriato l'utilizzo di grandezze puramente economiche all'interno di una LCA. L'approccio metodologico prevede pertanto l'impiego di sole grandezze energetiche e ambientali con il chiaro intento di collegarle a quelle di carattere economico solo in un momento successivo e comunque in maniera indipendente.

#### *4.3.1.4 Elementi di analisi energetica*

Per affrontare in maniera corretta le questioni riguardanti il consumo di risorse e la generazione di reflui da parte dei processi produttivi è necessario richiamare alcuni concetti fondamentali della metodologia di analisi energetica.

L'analisi energetica-tecnica, che deve il suo nome al fatto che tratta sistemi produttivi industriali da un punto di vista prettamente energetico, si è sviluppata soprattutto negli anni settanta in seguito al progressivo e consistente aumento del costo dell'energia (crisi petrolifere del 1973 e 1979), con l'obiettivo di studiare le modalità di generazione dei consumi energetici nei processi produttivi e i criteri per la loro riduzione.

I dati energetici costituiscono informazioni preziose che accompagnano e integrano quelle economiche per una valutazione completa del sistema produttivo.

Lo sviluppo dell'analisi energetica ha portato all' "analisi termoeconomica" che utilizza l'exergia e il valore monetario per rappresentare i flussi all'interno del sistema considerato.

La "teoria del costo energetico" (TCE) sviluppata sulla base di queste grandezze consente una Contabilizzazione dei costi (in termini sia energetici che economici) in grado di fornire una descrizione completa del sistema.

#### *4.3.1.5 Energia, efficienza energetica ed exergia*

L'energia è la causa di tutte le trasformazioni: utilizzando il linguaggio della termodinamica, l'energia è formalmente definita come la capacità di dare lavoro.

Essa si presenta sotto molteplici aspetti e ha la caratteristica peculiare di passare dall'uno all'altro di questi mantenendo costante la sua quantità complessiva: quelle che percepiamo o misuriamo nello studiare l'energia in gioco in un processo produttivo sono semplicemente forme diverse di energia, in quanto un processo non può creare o distruggere energia ma solamente convertirla secondo le leggi della termodinamica.

L'energia si conserva ma, via via che fluisce attraverso i sistemi, diminuisce la sua capacità di indurre trasformazioni, come è chiarito nel secondo principio della termodinamica.

Si dice exergia la quota di una risorsa energetica utilizzabile in un processo termodinamicamente reversibile (ideale). Si può anche definire come la quota parte dell'energia idealmente trasformabile in lavoro.

La reazione che lega le grandezze in gioco è la seguente:

$$\text{Energia} = \text{Exergia} + \text{anergia}$$

Dove l'anergia rappresenta la parte non utile dell'energia.

L'exergia è dunque un parametro di qualità termodinamica in grado di stabilire i punti in cui si producono le irreversibilità di processo e quindi suggerire al progettista quali accorgimenti adottare per aumentare l'efficienza del sistema.

A questo punto è possibile introdurre il concetto di efficienza energetica: in prima approssimazione, essa può essere definita come il rapporto tra un prodotto utile di un processo e l'energia spesa nello stesso.

L'exergia viene distrutta in ogni processo irreversibile, fornendo una base di computo dell'entità di energia che viene destinata alla funzione prevista.

La scelta di utilizzare l'energia o l'exergia nell'analisi del ciclo di vita è strettamente legata agli obiettivi stessi dell'analisi, ai fenomeni che si ritiene opportuno evidenziare e soprattutto al sistema in oggetto.

Le analisi LCA vengono però normalmente impostate utilizzando l'energia come grandezza fondamentale in quanto uno degli obiettivi principali è quello di riconoscere e quantificare in unità energetiche le fonti di energia primaria impiegate dal sistema e per i suoi usi finali; un altro motivo è che i dati utilizzati sono quasi sempre disponibili in questa forma.

#### *4.3.1.6 Classificazione delle energie in una analisi energetica*

Obiettivo principale dell'analisi energetica è quello di stabilire il carico energetico connesso a un processo produttivo.

Per quanto riguarda la classificazione di energie in un'analisi energetica, si contabilizzano gli apporti di energia in base al tipo di contributo e non alla loro natura.

Classificazione delle energie:

- *Energia di investimento*: il primo contributo al carico energetico complessivo da considerare per un sistema è quello derivante dalla realizzazione dei macchinari e delle infrastrutture necessarie al sistema stesso per ottenere la funzione desiderata. L'energia di investimento (e le emissioni associate) può essere anche rilevante soprattutto a causa delle grandi quantità di materiali impiegati, ma essendo il periodo di utilizzazione dei macchinari e delle infrastrutture normalmente piuttosto lungo, il

carico ambientale in termini LCA risulta essere generalmente trascurabile quando confrontato con quello di qualunque prodotto generato.

- *Energia diretta e indiretta*: la prima rappresenta la quota di energia consumata per il funzionamento del processo, mentre la seconda comprende l'energia necessaria per produrre e trasportare l'energia e i materiali utilizzati nel processo medesimo (è da sottolineare il contributo fondamentale dovuto all'energia di produzione e trasporto dei combustibili utilizzati direttamente nel processo indagato).
- *Energia feedstock*: energia contenuta nei materiali, potenzialmente combustibili, che sono utilizzati come tali e non come combustibili (ad esempio i prodotti organici utilizzati nell'industria petrolchimica). Questa quota, chiamata feedstock, è definita come il contenuto energetico dei materiali input che, in linea di principio, può essere eventualmente recuperato dai prodotti in uscita.

Tenere separata la quota di energia spesa come combustibile nel processo da quella contenuta nei materiali solo potenzialmente combustibili è importante. Questo perché mentre la prima è irreversibilmente consumata, la seconda è ancora potenzialmente disponibile alla fine della vita utile del prodotto, influenzando così la valutazione degli impatti derivanti dal fine vita.

A questo proposito, è importante ricordare che il contenuto energetico degli input può essere diverso da quello degli output a causa delle perdite di materia durante il processo produttivo.

Concludendo, con feedstock si intende di solito il potenziale calorifico dei materiali input del sistema (facendo convenzionalmente riferimento al loro potere calorifico superiore).

- *Energia fornita dai lavoratori*: quota di energia fornita dai lavoratori e quella spesa per il loro trasporto sul posto di lavoro
- *Energia cumulativa*: è possibile dire che il consumo di energia globale relativo a un sistema produttivo è dato dalla somma dei contributi di tutte le quote rilevanti di energia di ogni singola operazione, ovvero: energia diretta, energia indiretta, energia feedstock.

In altre parole, il consumo globale di energia di un sistema produttivo, corrisponde all'energia complessiva che occorre "estrarre" dalla terra per poter disporre di quell'unità di bene economico.

#### *4.3.1.7 Contenuto energetico dei materiali e richiamo sui combustibili*

Le leggi fondamentali da tenere presenti nello svolgimento di un'analisi energetica, come una LCA, sono la legge di conservazione di massa e le leggi della termodinamica.

Per quanto riguarda gli aspetti di termodinamica chimica, necessari soprattutto per trattare correttamente i combustibili e i materiali coinvolti nei processi di trasformazione, è importante introdurre il concetto di “energia libera”  $G$  (detta anche di Gibbs), definita come differenza tra l'entalpia  $H$  e il prodotto tra la temperatura  $T$  e l'entropia  $S$  con riferimento alle condizioni standard.

La variazione di energia libera in un processo di trasformazione risulta espressa così:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

In linea teorica, possono essere definiti combustibili tutte le sostanze che in opportune condizioni sono capaci di combinarsi con un comburente sviluppando calore. Da un punto di vista industriale, vengono invece considerati combustibili solamente quelli dotati di alcuni requisiti specifici, quali il costo relativamente basso, la facilità di estrazione e preparazione, l'elevata velocità di combustione e il fatto di non dare origine a sostanze tossiche.

Il potere calorifico di un combustibile è certamente uno dei dati che maggiormente interessano nello svolgimento di un'analisi energetica: è definito come il calore complessivamente sviluppato dall'unità di massa quando il combustibile viene completamente bruciato in presenza di ossigeno e la temperatura e la pressione dei reagenti e prodotti sono quelli standard.

Da un punto di vista economico, il potere calorifico costituisce la base quantitativa per la valutazione e il commercio dei combustibili.

Se il combustibile contiene idrogeno, vengono definiti due tipi di potere calorifico: superiore e inferiore.

Il potere calorifico superiore (PCS) corrisponde alla quota di energia liberata sotto forma di calore quando il combustibile è completamente bruciato in ossigeno e tutta l'acqua prodotta al termine della combustione si trova allo stato liquido.

Il potere calorifico inferiore (PCI) è invece la quota di energia liberata sotto forma di calore quando il combustibile viene bruciato completamente con ossigeno e tutta l'acqua presente nei prodotti di combustione è raffreddata alla temperatura di 100°C, ma rimane allo stato gassoso.

Il PCI è pertanto uguale al PCS meno il calore di vaporizzazione dell'acqua che dipende dalla pressione e temperatura di riferimento.

Mentre nelle analisi di processi industriali (in particolare nelle analisi exergetiche) da un punto di vista dei rendimenti degli impianti si utilizza convenzionalmente il potere calorifico inferiore, per il calcolo dei consumi di risorse energetiche è importante utilizzare quello superiore o totale, in quanto, fornisce proprio il contenuto energetico effettivamente sottratto ad una risorsa naturale in seguito alla combustione.

Per quanto riguarda le conseguenze ambientali della combustione la CO<sub>2</sub> ne rappresenta l'aspetto fisiologico. La CO<sub>2</sub> di per sé non è velenosa, ma il suo accumulo nell'atmosfera provoca degli scompensi alla temperatura sulla superficie terrestre (effetto serra).

L'ossido di carbonio (CO) si genera da una combustione incompleta ed è un prodotto tossico: mortale al di sopra di certe concentrazioni e per certi tempi di esposizione.

Lo zolfo (S) è un elemento che spesso si trova nei combustibili (carbone) ed essendo a sua volta combustibile reagendo con l'aria forma l'anidride solforosa, tossica.

Gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), anch'essi impattanti, si formano quando l'aria viene portata ad alta temperatura.

I residui incombusti della reazione formano infine le ceneri, che vanno ad incrementare le scorie solide.

#### *4.3.1.8 Energia per produrre i combustibili*

Viene fatta una distinzione tra i combustibili primari e quelli derivati (*primary and secondary fuels*) in base all'effettiva provenienza. I materiali estratti dalla terra in grado di bruciare in aria per produrre energia sottoforma di calore (combustibili solidi, liquidi, gas) sono detti "combustibili primari", e insieme alle forme di energia direttamente utilizzabili a partire da risorse naturali, come l'idroelettrica, l'eolica e la solare, sono detti anche "fonti energetiche primarie", mentre è preferibile indicare le sorgenti di energia o le energie che da un combustibile primario vengono derivate (coke, energia termoelettrica, benzine...) con il termine di "combustibili derivati".

Con "vettore energetico" si intende qualsiasi forma fisica di trasporto di energia. L'energia elettrica è il vettore energetico per eccellenza.

La quantità di energia a disposizione dell'utente, che è stata definita energia diretta, è di solito costituita da un combustibile derivato, per produrre il quale è richiesta dell'energia: è dunque necessario spendere energia per rendere utilizzabile un combustibile.

In termini di LCA, ciò significa che occorre individuare quantitativamente tutta l'energia in gioco. In particolare, detta  $E_t$  l'energia totale di un combustibile, si deve porre:

$$E_t = E_p + E_c$$

Dove  $E_p$  è l'energia indiretta (*production and delivery energy*) ed  $E_c$  il contenuto energetico del combustibile pronto per l'uso (*energy content of delivered fuel*), cioè l'energia diretta a disposizione dell'utente.

Negli studi LCA il calcolo del carico energetico e ambientale relativo all'utilizzo di quote energetiche dovrà riferirsi all'intero ciclo di vita dei combustibili: esso comporta l'analisi dei processi di estrazione, trattamento a bocca di pozzo, trasporto e distribuzione nel caso dei combustibili fossili, delle operazioni di sfruttamento per l'energia idroelettrica e le altre fonti rinnovabili. In generale, l'efficienza energetica di produzione ( $\eta = E_c / (E_p + E_c)$ ) di un combustibile derivato risulta inferiore a quella del combustibile primario da cui deriva, a causa delle perdite di trasformazione.

Il mix energetico per la produzione di energia elettrica risulta estremamente variabile da paese a paese, sia per i contributi forniti dalle varie fonti primarie utilizzate sia per le tecnologie adottate.

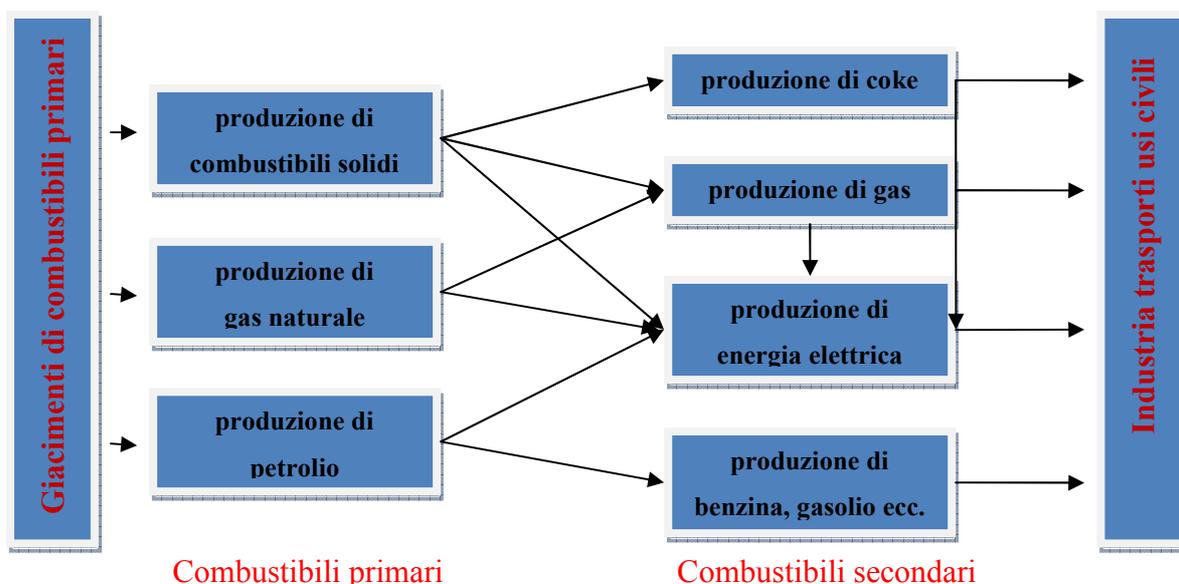
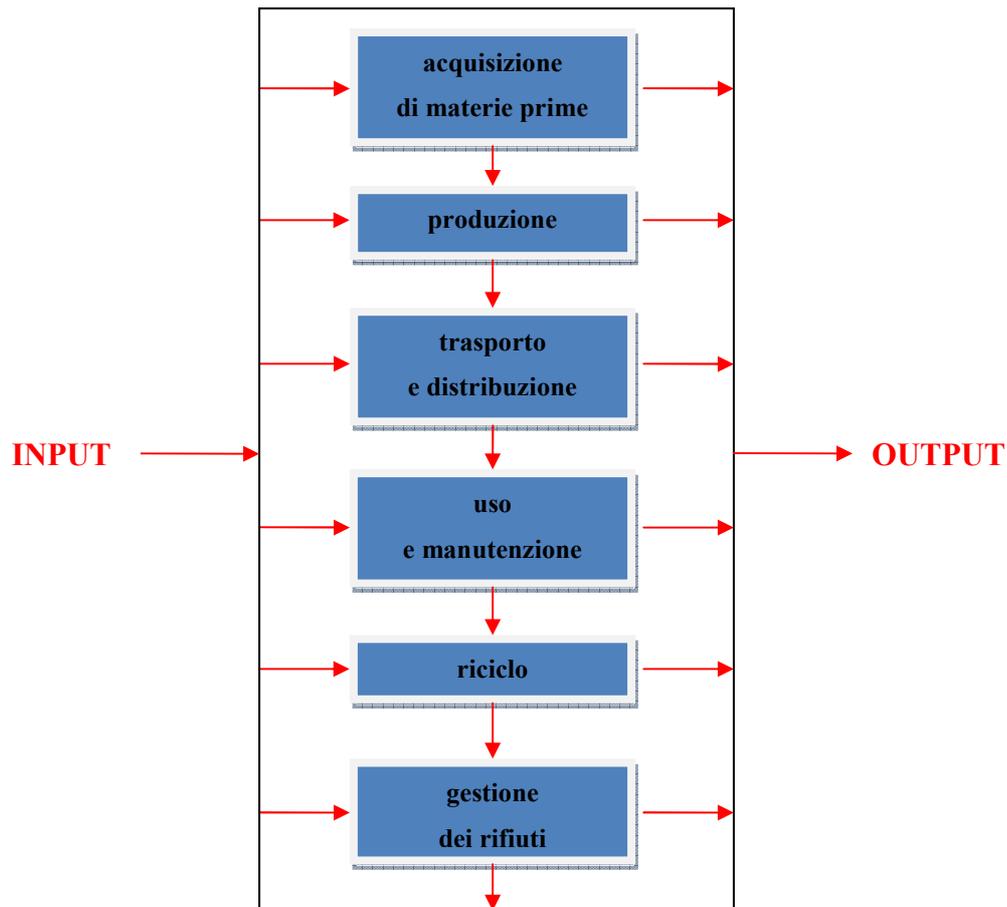


Figura 4.0.5 Diagramma di flusso semplificato dei combustibili primari e derivati

### 4.3.2 La seconda fase di una LCA: introduzione all'analisi di inventario

L'analisi di inventario è il momento più importante di una LCA, nel quale si procede alla costruzione di un modello analogico della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra le singole operazioni appartenenti alla catena produttiva (e distruttiva) effettiva.

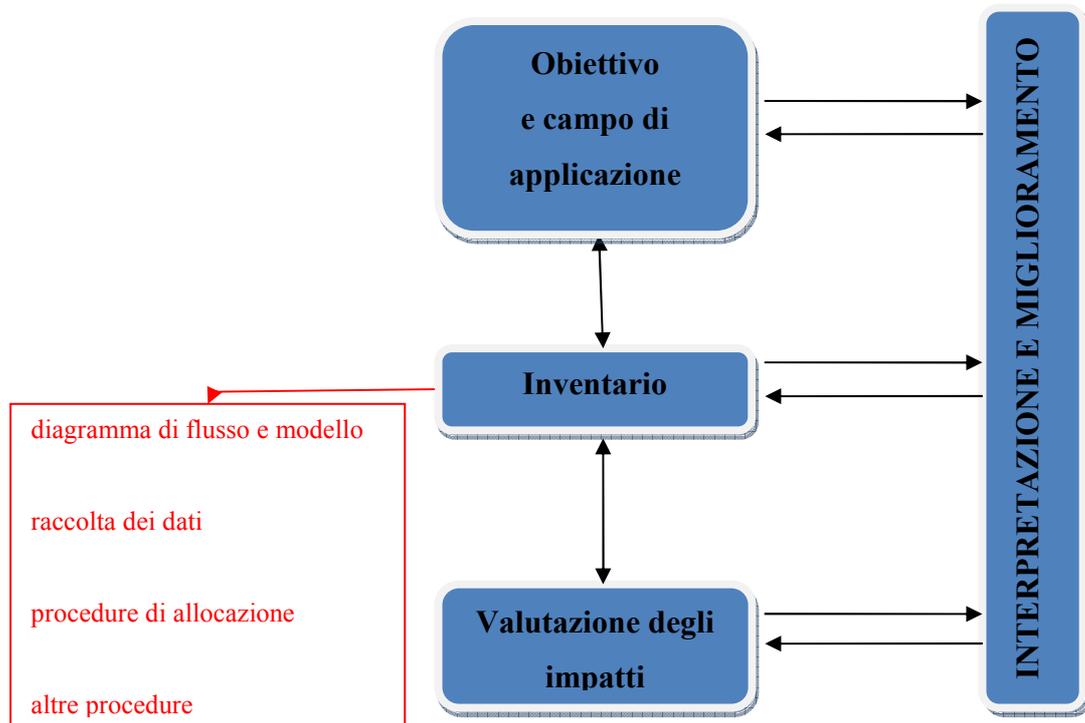


**Figura 4.0.4** L'analisi di inventario attraverso i principali processi che appartengono al generico sistema indicato

L'obiettivo di un inventario è, infatti, quello di fornire dati oggettivi, che solo in seguito potranno essere elaborati e commentati con lo scopo di trarre valutazioni e indicazioni utili a livello decisionale (fasi di *Life Cycle Impact Assessment* e *Life Cycle Interpretation*).

Un inventario di ciclo vita deve offrire garanzie di affidabilità, e per questo la sua redazione deve essere effettuata seguendo un codice ben definito. Solo in questo modo i risultati di più inventari possono essere fra loro confrontabili.

La norma ISO 14040 fornisce questo codice, il quale è strutturato nel modo seguente:



**Figura 4.0.5** La fase di inventario vista attraverso lo schema proposto dalla ISO 14040

La raccolta e l'affidabilità dei dati è un aspetto molto importante e per questo motivo la maggior parte delle informazioni di dettaglio può essere tratta dalla letteratura tecnica o da banche date appositamente predisposte (*secondary data*). Se i dati vengono raccolti direttamente sul campo vengono definiti *primary data*.

L'utilizzo di banche dati semplifica molto la ricerca delle informazioni, ma pone, a volte, il problema dell'attendibilità della fonte e della correttezza dell'interpretazione.

Molti *software* utilizzano le banche dati settoriali riconosciute a livello internazionale unitamente a banche dati realizzate da gruppi di ricerca o società di consulenza.

Resta comunque il conduttore della LCA il responsabile delle scelte fatte e a lui compete il dovere di giustificarle.

#### 4.3.2.1 Il problema dell'allocazione

In generale, gli input e gli output di un sistema fanno riferimento al sistema e non ai prodotti. Per convenzione è utile intendere un sistema industriale come l'insieme dei dispositivi che

realizzano una o più operazioni aventi una determinata funzione: il suo comportamento può essere in pratica sintetizzato nel prodotto utile che esso genera.

Una delle prime operazioni da compiere in una LCA è quella di dividere il sistema in oggetto in sottosistemi ognuno dei quali produce (o utilizza) un singolo prodotto e tali che, una volta aggregati, portino a un sistema di caratteristiche uguali a quelle del sistema di partenza.

Affinché gli input e gli output del sistema globale siano assegnati correttamente ai singoli sottosistemi, è bene procedere con un'operazione di "allocazione" (*allocation* o *partitioning*), che consiste nell'associare i carichi energetici e ambientali ai vari co-prodotti e sottoprodotti di un processo.

In questo modo si è in grado di affrontare lo studio di sistemi complessi sintetizzando il comportamento del sistema con indici energetici e ambientali.

La via più comunemente impiegata nell'allocazione prevede l'utilizzo - come termine di riferimento dei carichi ambientali - delle caratteristiche fisiche dei prodotti (come la massa, il volume, l'energia o l'exergia).

È bene ribadire che i fenomeni chimici e fisici che governano i processi produttivi non sono vincolati da considerazioni economiche, rendendo queste ultime utilizzabili come metodo di allocazione solo in condizioni e con modalità particolari (ad esempio nel caso non sia possibile procedere con i metodi basati sulle grandezze fisiche).

Nonostante la ISO 14044 dia come possibile alternativa la soluzione di tipo economico, è doveroso evidenziare il grande limite di questo metodo derivante dalla variabilità del mercato in cui sono collocati i co-prodotti.

#### *4.3.2.2 I sistemi di trasporto*

I trasporti costituiscono un elemento vitale per la maggioranza dei processi produttivi industriali e spesso la quantità di energia ad essi legata (e le conseguenti emissioni generate) rappresenta una parte significativa dell'energia complessiva spesa nel processo in esame. Lo stesso vale di conseguenza per le emissioni derivanti da tali operazioni.

Anche nel caso dei trasporti, è possibile dividere l'apporto di diversi contributi; per quanto riguarda quelli energetici, è possibile proporre questa classificazione:

- contenuto energetico dei combustibili consumati direttamente dal mezzo considerato, più la quota di energia indiretta necessaria a produrre il combustibile; è normalmente

proporzionale alla distanza percorsa e dipende dal sistema di trasporto, dalla portata del mezzo, dal tipo di viaggio, dalla manutenzione del veicolo e così via;

- energia necessaria alla costruzione e alla manutenzione del mezzo;
- energia necessaria a realizzare le infrastrutture per permettere il viaggio del mezzo stesso (o il suo alloggiamento nel caso di una condotta), dalla costruzione di strade e ferrovie al loro mantenimento.

Una classificazione del tutto simile può essere predisposta anche per le emissioni derivanti dai contributi appena elencati. In tal caso è chiaro che, per quanto riguarda l'impatto ambientale dei sistemi di trasporto, le emissioni atmosferiche legate alla fase diretta di consumo energetico risultano essere di gran lunga quelle più importanti da conoscere e valutare.

Il sistema di trasporto stradale è il sistema di gran lunga più usato nel mondo per il trasporto di cose e persone, seguito da quello ferroviario e navale (impiegati soprattutto per grandi distanze e notevoli dimensioni di carico). Il trasporto aereo è invece meno frequente nella movimentazione delle merci.

#### 4.3.2.3 La gestione del “fine vita” nell'analisi di inventario

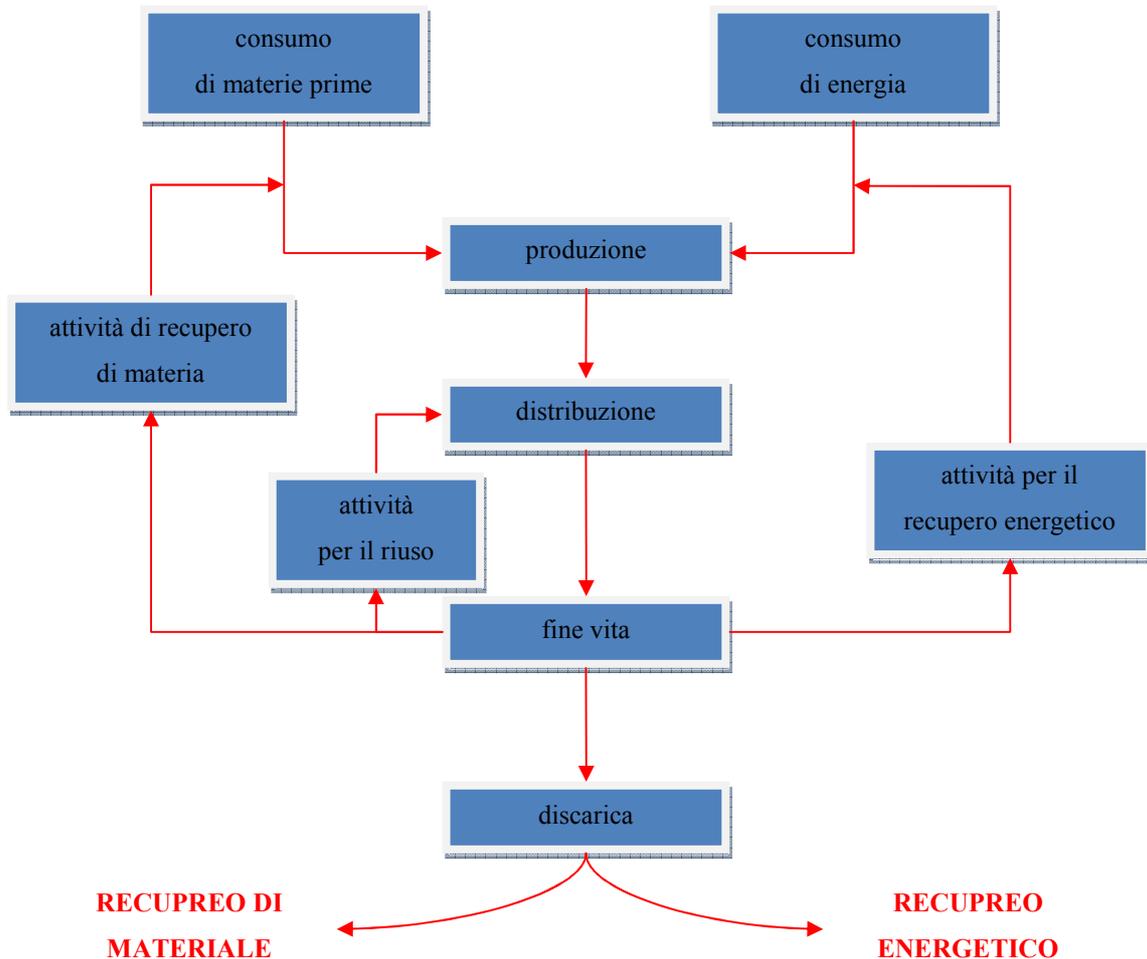
Lo studio del ciclo di vita di un sistema non può prescindere dal valutare quali siano le ricadute ambientali della gestione dei materiali che giungono a fine vita e che devono essere trattati come rifiuti. La ragione risiede nel fatto che, se da un lato i rifiuti costituiscono uno dei problemi centrali dei sistemi produttivi, dall'altro l'approccio LCA rappresenta un supporto per definire, già nella fase progettuale di un processo o di un prodotto, le scelte migliori per l'effettiva riduzione degli impatti, non solo ambientali, ma anche economici e sociali, dovuti alla gestione dell' *end of life*.

Quando un bene è giunto al termine della sua vita utile, dopo la raccolta, si presentano tre strade possibili:

- il recupero di materia;
- il recupero di energia;
- lo smaltimento in discarica.

Ognuna di queste alternative presenta degli aspetti ambientali che devono essere attentamente analizzati e confrontati con i relativi benefici per poter dirigere le scelte strategiche verso l'una o l'altra direzione.

Per quanto riguarda i processi che permettono il recupero del materiale, si deve distinguere tra il riuso e il riciclo: mentre il riuso prevede di riutilizzare lo stesso prodotto dopo un eventuale trattamento di ricondizionamento, il riciclo permette di recuperare il materiale contenuto nel prodotto giunto a fine vita per fabbricare il medesimo o un altro prodotto.



**Figura 4.0.6** La gestione del fine vita integrata nel sistema di ciclo vita

La strada del recupero energetico è possibile mediante processi di termovalorizzazione che permettono la produzione di energia elettrica o termica recuperando l'energia feedstock presente nei materiali di scarto che possono essere utilizzati tal quali o dopo delle attività di selezione mirate alla massimizzazione dell'efficienza energetica (come ad esempio la produzione di CDR<sup>5</sup>).

Un'ultima modalità di gestione dei rifiuti è rappresentata dalla discarica controllata nella quale confluiscono tutti i materiali che non hanno trovato collocazione nei processi appena citati.

<sup>5</sup> Combustibile da rifiuto

#### *4.3.2.4 La raccolta*

Uno dei primi processi coinvolti nella gestione dei materiali a fine vita è la raccolta e il trasporto dei materiali. I carichi ambientali associati a questa operazione sono connessi al calcolo degli impatti complessivi del sistema e dipendono dalla gestione dei mezzi (realizzazione, carburante e manutenzione) e dalle attrezzature specifiche.

#### *4.3.2.5 Il recupero di materia: riuso e riciclo*

Il recupero del materiale in senso stretto è quello che generalmente viene definito riciclaggio e che consiste nell'utilizzare il materiale costituente il manufatto che ha completato la sua vita utile per la produzione di nuovi manufatti costituiti in parte o interamente dello stesso materiale.

Tale attività può permettere il risparmio delle materie prime utilizzate per la fabbricazione di nuovi manufatti, anche se è chiaro come il limite di applicazione del riciclo risieda sia nelle caratteristiche qualitative del manufatto che è possibile fabbricare utilizzando la materia prima secondaria oggetto del recupero, sia nella disponibilità di filiere in grado di valorizzare il materiale stesso.

Riuso: consiste nel riutilizzare il manufatto che è giunto a fine vita per la stessa funzione che aveva svolto nel corso del ciclo di vita utile senza apportare sostanziali modifiche.

La via del riutilizzo è strettamente dipendente dal modo in cui vengono gestiti i manufatti a fine vita; questi devono tornare al produttore in condizioni tali da essere idonei per un nuovo impiego. In ogni caso, non tutti i manufatti possono essere gestiti pensando al riutilizzo in quanto in alcuni casi la funzione comporta il degrado delle caratteristiche del manufatto stesso. Generalmente, i materiali più idonei a questo tipo di raccolta sono costituiti dagli imballaggi che, possono essere agevolmente recuperati con una raccolta del tipo “vuoto a rendere”.

Riciclo: rappresenta una delle operazioni più importanti dal punto di vista ambientale grazie alla riconosciuta capacità di portare un risparmio di energia e di materie prime, ma non deve essere considerato un obiettivo da perseguire a tutti i costi, quanto piuttosto un meccanismo

che, in generale, può permettere di raggiungere alcuni obiettivi di carattere ambientale. È quindi importante, prima di promuovere una qualsiasi operazione di riciclo, dimostrare gli effettivi benefici.

Si possono individuare due strategie di riciclo in base al destino del materiale recuperato: il riciclo aperto e il riciclo chiuso.

Un sistema di riciclo si definisce chiuso quando il materiale da avviare al riciclo rientra in circolo nel medesimo processo che lo ha generato, sostituendo i materiali vergini in ingresso secondo modalità caratteristiche del processo stesso oppure quando non vi sia un cambiamento nelle proprietà del materiale.

Un sistema di riciclo aperto è caratterizzato invece dal fatto che il materiale scartato dalle linee di produzione, o quello giunto alla fine della propria vita utile, rientra in circolo in un processo diverso da quello originario coinvolgendo un cambiamento delle sue proprietà.

In generale, il meccanismo di riciclo dovrà dunque essere valutato confrontando il consumo energetico e l'impatto ambientali conseguenti alle operazioni effettuate per recuperare e processare nuovamente gli scarti o i prodotti a fine vita, con i consumi e gli impatti derivanti dalla produzione dello stesso prodotto con materie prime vergini e della messa a discarica degli stessi scarti.

#### *4.3.2.6 Il recupero di energia*

Le attività di recupero energetico sono tutte quelle che permettono di ricavare energia dal materiale da post-consumo: tra tutte, la più nota è la termovalorizzazione, anche se il recupero di energia può essere fatto secondo svariate tecnologie. Al riguardo può essere proposta una classificazione che suddivide i processi a seconda del fatto che il recupero avvenga direttamente, mediante la combustione del materiale, o indirettamente mediante la trasformazione del materiale in un gas combustibile. La principale differenza tra le due categorie sta nel fatto che nel primo caso il recupero si effettua necessariamente nello stesso impianto dove avviene il processo, nel secondo caso il gas combustibile potrebbe teoricamente essere stoccato in un luogo diverso dove il recupero energetico è maggiormente conveniente.

Analizzando le attività di recupero dell'energia secondo i criteri già presentati, si giunge alla considerazione che il bilancio energetico dei processi è basato sul quantitativo di energia feedstock contenuto nei materiali avviati al recupero. In pratica, l'energia massima

teoricamente recuperabile da un materiale è costituita proprio dalla quantità feedstock che, come già illustrato, viene inserita nel ciclo di un materiale dal momento in cui una risorsa potenzialmente combustibile viene estratta dalla terra e rimane nel ciclo fino a quando, con una operazione di recupero energetico, viene convertita in energia termica.

Termovalorizzazione: consiste nel far avvenire la combustione del materiale in un impianto che permette il recupero di parte dell'energia termica contenuta nei fumi di combustione.

Al fine di ottimizzare il recupero energetico ottenibile, il materiale deve avere il potere calorifico più alto possibile e non deve contenere materiali inerti o che durante la combustione generino sostanze inquinanti difficili da trattare.

È opportuno che il processo di termovalorizzazione sia sempre preceduto da raccolte differenziate o processi di selezione mirati a ottimizzare le caratteristiche merceologiche dei materiali.

Riguardo agli aspetti locali (emissioni di sostanze tossiche e polveri, ecc), questi devono essere affrontati con analisi molto approfondite e che tengono conto delle molteplici caratteristiche territoriali, climatiche, sociali, topografiche del sito in cui sarà insediato l'impianto.

Riguardo agli aspetti globali, come le emissioni di gas serra, questi potranno essere gestiti con le metodologie che prevedono un approccio globale al problema, tipico di una LCA.

Si devono inoltre considerare gli impatti a scala regionale quali l'acidificazione e l'eutrofizzazione.

Processi indiretti: consentono di valorizzare l'energia feedstock contenuta in materiali senza procedere alla combustione del materiale stesso. I più importanti sono la gassificazione, la pirolisi e la digestione anaerobica.

#### *4.3.2.7 La discarica*

L'ultimo elemento di una qualsiasi filiera di gestione dei rifiuti è la discarica che può avere differenti caratteristiche costruttive a seconda della pericolosità dei rifiuti che è destinata a ricevere; anche se questo non è in linea con le politiche ambientali comunitarie, la messa a discarica rimane oggi la destinazione più utilizzata in Italia per i rifiuti, specialmente per quelli urbani.

Anche la discarica deve essere vista come un'unità di processo inserita nel sistema di gestione complessivo e come tale ne deve essere valutato il carico ambientale in fase di costruzione e funzionamento.

#### *4.3.2.8 Aspetti metodologici principali*

Per valutare i benefici del recupero di materia o di energia, soprattutto nel frequente scenario del riciclo aperto, è consueto l'utilizzo della metodologia conosciuta come quella degli "impatti evitati". In pratica, dato un sistema che permette un recupero, mediante questo approccio si sottraggono dagli impatti ambientali generati quelli associati alla produzione dei flussi recuperati secondo le prestazioni ambientali delle filiere tipicamente utilizzate.

Il risultato di questo approccio è quindi la valutazione degli impatti ambientali di un sistema tenuto conto anche, in termini quantitativi, dei benefici associati agli eventuali recuperi.

Uno degli aspetti ambientali più importanti è quello legato all'effetto serra. Il principale responsabile di tale fenomeno è la CO<sub>2</sub>. Di questo aspetto si parlerà più specificatamente in seguito.

#### *4.3.2.9 Risultati di un'analisi di Inventario*

I risultati di un inventario di ciclo vita sono normalmente presentati in sei principali categorie di parametri:

- 1) materie prime;
- 2) combustibili primari;
- 3) feedstock;
- 4) rifiuti solidi;
- 5) emissioni in aria;
- 6) emissioni in acqua.

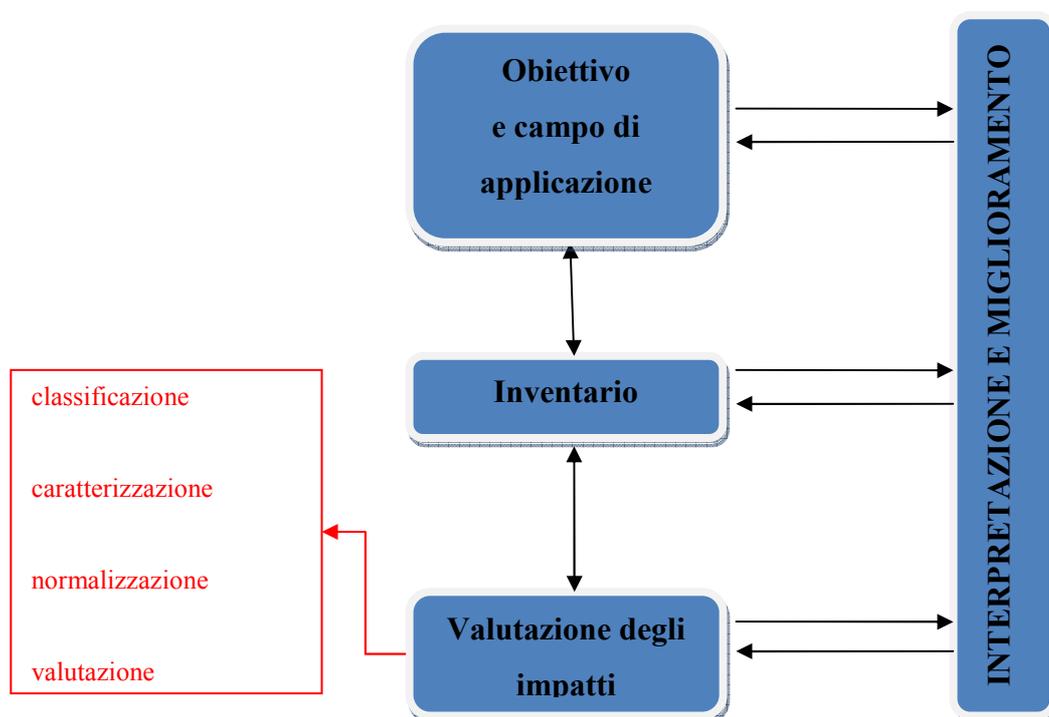
Per comodità e per agevolare la successiva fase di valutazione degli impatti, è possibile raggruppare queste categorie in:

- "risultati energetici": i combustibili primari e l'energia feedstock.
- "risultati ambientali": il consumo di materie prime, i rifiuti solidi, le emissioni in aria e in acqua.

Questa fase è preparatoria all'analisi degli impatti e per questo non include alcuna valutazione degli affetti sull'ambiente dei reflui contabilizzati.

### 4.3.3 La terza fase di una LCA: l'analisi degli impatti (LCIA)

Le informazioni ottenute dall'analisi di inventario costituiscono, come già si è detto, la base di partenza per valutazioni di tipo ambientale, cui è dedicata la fase LCA definita Life Cycle Impact Assessment (LCIA) e regolata dalle norme ISO 14040 e ISO 14044.



**Figura 4.0.7** L'analisi degli impatti nello schema operativo di una LCA secondo le ISO 14040 e ISO 14044

Sulla base di quanto è stato detto nel presentare la struttura complessiva di una LCA, l'analisi degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente (emissioni o reflui) e del consumo di risorse associati a un'attività produttiva.

Questo compito risulta essere tutt'altro che semplice, specialmente per quanto riguarda le conseguenze derivanti dalle emissioni nell'ambiente: esistono problemi oggettivi per l'individuazione e successiva interpretazione scientifica delle correlazioni fra le emissioni stesse e gli effetti ambientali.

La norma ISO definisce “impatto ambientale una qualsiasi modificazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l’ambiente”. Poiché non è possibile correlare inequivocabilmente uno specifico impatto ai suoi effetti ambientali, ci si deve limitare ad affermare che l’impatto è ciò che prelude a un effetto, senza pretende di poter quantificare rigorosamente il secondo sulla base del primo.

Mentre possiamo ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati della fase di analisi di inventario, i corrispondenti effetti ambientali potranno essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni.

Gli effetti dovuti alle sostanze rilasciate nell’ambiente si verificano nelle immediate vicinanze del punto di emissione oppure possono avere una ricaduta su tutto il pianeta. Quindi, gli effetti ambientali si suddividono in effetti globali, regionali o locali.

Prendendo ad esempio dalle emissioni di CO<sub>2</sub> responsabili dell’effetto serra: analizzandone il tempo di permanenza in atmosfera è possibile classificare l’effetto serra come un effetto a scala globale in quanto è stato appurato che l’emissione di gas serra in un punto contribuisce all’effetto su tutto il pianeta; per le emissioni di rumore invece è chiaro che queste debbano essere considerate solo a scala locale.

E’ quindi opportuno evidenziare che un eventuale giudizio di valore sul significato ambientale degli impatti può riguardare solo gli effetti globali, intendendo quelli che si manifestano a scala planetaria o regionale.

Il peso globale di un determinato inquinante è infatti il risultato di numerosi contributi spesso provenienti da diverse aree geografiche della terra, e gli output riferiti a diversi periodi di tempo. Dunque i risultati di un’analisi di inventario possono essere utilizzati per la valutazione di effetti su scala globale.

Inoltre le sostanze emesse durante la trasmissione possono subire trasformazioni chimiche, fisiche o biologiche dando origine ad altri composti. Per esempio la formazione di ossidanti fotochimici derivanti dall’interazione che la luce del sole ha con gli idrocarburi emessi in atmosfera, portando alla formazione di molecole di ozono; oppure se si considera il totale delle emissioni di SO<sub>2</sub> provenienti dai risultati di inventario, le piogge acide, l’acidificazione conseguente e l’eventuale perdita di biodiversità in un lago sono le conseguenze ipotizzabili immediatamente.

Comprendere i fenomeni di interazione dell’attività antropica con l’ambiente costituisce un obiettivo importante per promuovere in ambito industriale la nuova cultura della produzione basata sul concetto di sviluppo sostenibile.

L'obiettivo sarà anche di scoprire, nell'ambito del sistema in esame, dove e come intervenire per ottenere una minimizzazione dell'impatto dovuto a tali processi analizzati.

La valutazione di impatto del ciclo di vita consiste in un processo tecnico-quantitativo e/o qualitativo per la caratterizzazione e la valutazione degli impatti ambientali delle sostanze identificate nella fase di inventario. In questo *step* sono valutati gli effetti sulla salute e sull'ambiente, indotti dal processo o dal prodotto durante il corso del suo ciclo di vita.

La struttura concettuale della Valutazione di Impatto fa riferimento alle norme ISO 14040 e ISO 14044 che la definiscono e la standardizzano nelle fasi descritte di seguito.

#### *4.3.3.1 Selezione e definizione delle categorie di impatto*

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

- completezza: comprendere tutte le categorie, a breve e a lungo termine, su cui il sistema potrebbe influire;
- indipendenza: evitare intersezioni tra le categorie, che comporterebbero conteggi multipli;
- praticità: la lista formulata non dovrà spingersi ad un dettaglio elevato, contemplando un numero eccessivo di categorie.

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

- estrazione di risorse abiotiche, al cui interno sono incluse tre differenti tipologie di elementi naturali: i depositi di combustibili fossili e minerali, considerati risorse limitate in quanto non rinnovabili nel breve periodo; le risorse, quali acque sotterranee, sabbia e ghiaia; le risorse rinnovabili come le acque superficiali, l'energia solare, il vento, le correnti oceaniche; estrazione di risorse biotiche, cioè tipologie specifiche di biomassa raccolte sia in maniera sostenibile, sia in maniera non sostenibile;
- uso del territorio, la cui gestione errata porta ad una riduzione del numero di specie animali e vegetali presenti, rispetto alle condizioni naturali;

- effetto serra, che comporta un aumento della temperatura nella bassa atmosfera conseguenza della presenza di alcuni gas, quali l'anidride carbonica, il metano, il biossido di azoto, che intrappolano le radiazioni infrarosse;
- ecotossicità, provocata dalle emissioni dirette di sostanze tossiche, come metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi e sostanze liberate nel corso della degradazione dei prodotti, che danno luogo ad impatti sulle specie e sugli ecosistemi;
- smog fotochimico, in cui si considerano tutti gli impatti derivanti dalla formazione di ozono troposferico, causata dalle reazioni di componenti organici (VOC) in presenza di luce e di ossidi di azoto (NOx);
- tossicità umana, imputabile alla presenza di sostanze chimiche e biologiche, e dipendente sia dal tipo di esposizione, sia dalla metodologia attraverso la quale avvengono le emissioni nell'ambiente;
- acidificazione, causata dal rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, principalmente attraverso la pioggia; gli effetti sono evidenti nelle foreste di legno dolce, dove si manifestano in termini di crescita insufficiente: fenomeno particolarmente presente nella penisola scandinava e nelle regioni dell'Europa centro orientale. Negli ecosistemi acquatici si ha un abbassamento del pH delle acque, situazione deleteria per lo sviluppo della vita. Le conseguenze dell'acidificazione si rendono evidenti, inoltre, negli edifici, nelle opere d'arte e in tutte le costruzioni in genere attraverso l'erosione delle pietre calcaree.
- arricchimento in nutrienti, causato da un eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili e di tutti quegli elementi nutritivi che portano ad un incremento nella produzione di plancton, alghe e piante acquatiche in genere.

#### 4.3.3.2 Classificazione

È la fase di assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie di impatto ambientale (*impact categories*), noti gli effetti e i danni potenziali delle emissioni alla salute umana, all'ambiente, all'impoverimento delle risorse, ecc. Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto, saranno contenuti tutti gli input e output del ciclo di vita che contribuiscono allo sviluppo dei diversi problemi ambientali. La stessa sostanza o materiale potrebbe essere contenuta all'interno di più categorie di impatto.

#### 4.3.3.3 Caratterizzazione

Essa si affianca alla fase della classificazione ed ha lo scopo di quantificare l'impatto generato. Essa trasforma, attraverso una serie di calcoli, le sostanze presenti nell'inventario, e precedentemente classificate, in indicatori di carattere numerico, attraverso la definizione del contributo relativo di ogni singola sostanza emessa o risorsa usata. L'operazione viene effettuata moltiplicando i pesi delle sostanze emesse, o consumate nel processo, per i relativi fattori di caratterizzazione (*weight factors*), propri di ogni categoria di impatto. In sintesi, il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato, ed è stabilito da un'*Authority* sulla base di considerazioni di carattere prettamente scientifico.

Di seguito sono elencati i fattori peso per le varie categorie di impatto proposti da CML<sup>6</sup>, nell'ottobre 1992:

- Per la categoria estrazione di risorse abiotiche, il rapporto utilizzo/riserva  $W_j$ , espresso dalla relazione:  $W_j = G_j/R_j$  dove:
  - $G_j$  è il consumo corrente globale del minerale  $j$ ;
  - $R_j$  è la riserva del minerale  $j$ .
- Per la categoria estrazione di risorse biotiche, non è ancora stata realizzata una determinazione attendibile: si potrebbe definire un indicatore basato sulla rarità e sul tasso di rigenerazione della risorsa.
- Per l'effetto serra viene usato il parametro Potenziale di Riscaldamento Globale (*Global Warming Potential, GWP*), che definisce la potenziale influenza di una sostanza, valutata in termini relativi rispetto alla CO<sub>2</sub>, secondo orizzonti temporali di 20, 100 e 500 anni; questo per tenere conto del fatto che le varie sostanze si decompongono e inattivano solo in periodi di tempo molto lunghi.
- Per l'impoverimento dell'ozono è stato introdotto il parametro Potenziale di Riduzione dell'Ozono stratosferico (*Ozone Depletion Potential, ODP*): la sostanza di confronto rispetto alla quale si valuta l'effetto delle altre è il CFC11.
- Per l'effetto dell'ecotossicità sono stati introdotti i seguenti parametri:
  - ECA (*Aquatic Ecotoxicity*) [m<sup>3</sup>/kg], per la valutazione della tossicità delle acque;

---

<sup>6</sup> CML è un *database* che contiene fattori di caratterizzazione per le life cycle impact assessment (LCIA)

- ECT (*Terrestrial Ecotoxicity*) [m3/kg], per la valutazione della tossicità del terreno.
- Per la tossicità umana sono stati ideati gli indici:
  - HCA (*Human-toxicological Classification value for Air*), indice di classificazione per le sostanze emesse in aria;
  - HCW (*Human-toxicological Classification value for Water*), indice di classificazione per le sostanze emesse in acqua;
  - HCS (*Human-toxicological Classification value for Soil*), indice di classificazione per le sostanze emesse nel terreno.

Essi forniscono un'indicazione di massima e non hanno la pretesa di essere del tutto precisi e affidabili.

- Per lo smog fotochimico si usa il parametro Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico (*Photochemical Ozone creation potentials*, POCP), per i componenti organici. Tale parametro è espresso per le diverse sostanze in termini di equivalenza con l'etilene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>).
- Per la categoria acidificazione è usato il fattore Potenziale di Acidificazione (*Acidification Potential*, AP), stimato per ogni sostanza in termini di SO<sub>2</sub> oppure in termini di mole di H<sup>+</sup>.
- Per l'eutrofizzazione si usa il Potenziale di Eutrofizzazione (*Eutrophication Potential*, EP) espresso in termini di impoverimento in O<sub>2</sub>, oppure in PO<sub>4</sub>.

Gli indicatori citati, sono, per la maggior parte, gli stessi utilizzati all'interno del metodo degli Eco-indicator 99, presente all'interno del codice di calcolo SimaPro, utilizzato nello studio.

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

#### 4.3.3.4 Normalizzazione

In questa fase i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono normalizzati, cioè divisi per un “valore di riferimento” o “effetto normale” rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, europea o regionale, riferiti ad un determinato intervallo di tempo. Attraverso la normalizzazione si può stabilire la magnitudo, ossia l’entità dell’impatto ambientale del sistema studiato rispetto a quello prodotto nell’area geografica prescelta come riferimento. Secondo le norme ISO la fase di normalizzazione non è obbligatoria per un LCA completo.

#### 4.3.3.5 Valutazione

L’obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un indice finale, l’impatto ambientale associato al prodotto nell’arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono perciò moltiplicati per i “fattori di peso” della valutazione, relativi alle varie categorie di danno, spesso riportati in guide tecniche, che esprimono l’importanza intesa come criticità, attribuita a ciascun problema ambientale. Alla base del calcolo di tali fattori vi è il principio della “distanza dallo scopo”: essa afferma che quanto più è grande il divario tra lo stato attuale e quello ideale cui si tende, tanto maggiore risulta la gravità di un effetto. È evidente quanto sia soggettivo tale giudizio, che può variare per aree geografiche, sensibilità e scuole di pensiero differenti. In alcuni casi si utilizzano fattori di peso tutti uguali tra loro, in alternativa si assumono quelli forniti da alcune banche dati. Sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore adimensionale, l’indice ambientale finale, detto **ecoindicatore**, che quantifica l’impatto ambientale associato al prodotto.

#### 4.3.4 Il metodo degli Eco-Indicator99

*Eco-indicators* è una metodologia sviluppata dalla Pré (*Product Ecology Consultants*) per conto del Ministero dell’Ambiente Olandese: essa costituisce un potente strumento per i progettisti utile ad aggregare i risultati di un LCA in grandezze o parametri facilmente comprensibili ed utilizzabili, chiamati appunto Eco-indicatori.

I progettisti, infatti, pur non essendo solitamente esperti in materie ambientali, si trovano a prendere decisioni che influenzano fortemente le proprietà di un prodotto e l’impatto che esso determinerà sull’ambiente circostante.

Due rilevanti ostacoli, in modo particolare, impedivano l'effettivo utilizzo dell'LCA nella progettazione: innanzitutto l'esecuzione di un LCA richiedeva tempi troppo lunghi per risultare utile ai progettisti e, secondariamente, i risultati ottenuti erano spesso di difficile interpretazione.

La metodologia degli eco-indicatori risolve questi problemi grazie all'aggregazione dei risultati dei danni in tre sole categorie principali.

La versione seguita nell'ambito del presente studio è la più recente in ordine di tempo, risale infatti al 1999, e risulta di gran lunga migliore delle precedenti poiché, adottando un sistema di calcolo estremamente più articolato, comprende diversi aspetti altrimenti trascurati.

Nel procedere allo sviluppo di tale metodologia si è ritenuto importante partire dalla fase più critica e maggiormente controversa dello studio, quella finale. È proprio in questa fase che vengono attribuiti differenti pesi alle diverse categorie di danno, le quali sono perciò individuate in un numero sufficientemente ristretto e riguardano aspetti concreti e facilmente comprensibili. Lo schema principale del metodo valuterà esclusivamente tre tipi di danno ambientale:

1. *Human Health* (Salute umana);
2. *Ecosystem Quality* (Qualità dell'ecosistema);
3. *Resources* (Sfruttamento delle risorse).

Sono stati poi sviluppati dei modelli che legano tali categorie di danno alle sostanze individuate nello studio del ciclo di vita del prodotto.

Il metodo dell' LCA richiede in primo luogo un inventario di tutte le emissioni e di tutti i consumi di risorse da attribuire al prodotto nel suo intero ciclo di vita; il risultato di questo inventario è un elenco di emissioni, di consumi di risorse e di impatti di altro genere che, opportunamente organizzato, prende il nome di *inventory result*. Data la grande quantità di dati, al fine di rendere la procedura più comprensibile e facilmente interpretabile, è pratica comune raggruppare i tipi di impatto per categorie e calcolarne un punteggio globale, riferendosi così alle categorie di impatto piuttosto che alle differenti tipologie di impatto riscontrate.

Nello sviluppare i progetti *Eco-indicator 99* e *95* è stato utilizzato un approccio *top-down* attraverso il quale sono stati dapprima definiti i risultati richiesti dalla valutazione, nel caso specifico le tre categorie di danno precedentemente definite. Ciò ha implicato la necessità di una definizione chiara e univoca del termine "*ambiente*" e dell'approccio con cui affrontare e valutare i diversi problemi ambientali.

Quando si applicano gli *Eco-indicator 99* ad un LCA è necessario considerare che tutte le emissioni e tutte le forme di sfruttamento del territorio sono valutate con riferimento all'Europa. I risultati ottenuti devono essere inoltre considerati come marginali, nel senso che riflettono l'incremento del danno che si aggiunge ad un livello di danno corrente già presente. L'LCA si sviluppa attraverso tre campi della conoscenza umana, definiti come “*spheres*”:

- *Technosphere*, che riguarda la descrizione del ciclo di vita, le emissioni derivanti dai processi e tutte le procedure basate su relazioni di causa-effetto;
- *Ecosphere*, che comprende la modellizzazione dei cambiamenti, ossia dei danni arrecati all'ambiente;
- *Valuesphere*, che contempla la valutazione della gravità dei danni arrecati.

Le prime due “*sphere*” si basano su conoscenze scientifiche e naturali, la “*Valuesphere*”, invece, appartiene alla sfera delle scienze sociali, nelle quali non può esistere una verità univoca. Nelle valutazioni relative alla “*Technosphere*” le percentuali di incertezza sono relativamente basse, mentre in quelle relative alla “*Ecosphere*” i modelli utilizzati sono piuttosto incerti e difficilmente verificabili, inoltre i dati in ingresso sono spesso affetti da errori.

Comprendere il legame esistente fra queste tre “*sphere*” è essenziale per comprendere la metodologia degli *Eco-indicator 99*. Il ciclo di vita, infatti, viene costruito nell'ambito della “*Technosphere*” e il suo risultato è l'inventario. Il legame tra i dati presenti nell'inventario e le tre categorie di danno avviene attraverso il modello realizzato nella “*Ecosphere*”. Il modello della “*Valuesphere*” viene utilizzato per pesare le tre categorie di danno secondo un unico indicatore.

Il campo di indagine è *l'ambiente* in senso generale, considerato come *un sistema il cui stato è definito da un insieme di parametri fisici, chimici e biologici influenzati dall'uomo*, legati a loro volta a condizioni necessarie alla sopravvivenza dell'uomo stesso e della natura.

Queste condizioni includono la salute umana, la qualità dell'ecosistema e il reperimento delle risorse.

Il concetto di salute umana (*Human Health*) si basa sull'assunzione che tutti gli esseri umani, nel presente o nel futuro, saranno esenti da malattie, invalidità o morti premature causate dalla qualità dell'ambiente circostante.

La presenza di una buona qualità dell'ecosistema (*Ecosystem Quality*) implica che le specie animali e vegetali interessate non siano soggette a cambiamenti indotti che alterino la loro presenza e collocazione geografica.

La categoria relativa al reperimento delle risorse (*Resources*) considera il concetto che la scorta di sostanze essenziali per lo sviluppo della civiltà odierna possa essere o meno disponibile anche per le generazioni future.

Si può notare come sarebbe stato possibile selezionare anche altre categorie di danno, oltre alle precedenti, come, ad esempio, la prosperità, la felicità, l'uguaglianza, la sicurezza. Questi aspetti non sono stati presi in considerazione, sia perché troppo complessi da definire all'interno di un modello, sia perché, generalmente, l'effetto di alcuni prodotti su queste categorie è talmente ambiguo da risultare difficilmente interpretabile.

## **Inventario**

La metodologia Eco-indicator 99 necessita di alcune specificazioni per la definizione dell'inventario, in cui sono prese in considerazione emissioni in aria, acqua e suolo:

- un parametro da considerare e specificare è la concentrazione delle polveri fini;
- gli effetti dei fertilizzanti utilizzati in agricoltura non sono da considerare come emissioni nel suolo poiché già inclusi nei dati sullo sfruttamento del terreno;
- i quantitativi di pesticidi, fungicidi e erbicidi direttamente applicati al suolo vengono considerati come emissioni al suolo coltivato. Nell'analisi di previsione viene calcolata la quantità di tali sostanze che emigrano verso altri comparti (aria, acqua, suolo naturale e industriale): la parte rimanente che resta sul suolo coltivato non è modellata ma è inclusa nei dati sul *land-use*;
- l'azione delle sostanze radioattive, classificate in isotopi, è valutata in *becquerel*;
- i minerali e i combustibili fossili non vengono considerati come materiali grezzi;
- l'uso del territorio viene definito come prodotto dell'area per il tempo di occupazione, ed è dipendente dal tipo di uso; se è oggetto di trasformazioni deve essere specificata la destinazione originale e quella ottenuta dopo la modifica.

## **La Caratterizzazione**

Il metodo utilizza quattro differenti procedure per collegare l'inventario alle tre categorie di danno principali; tali connessioni permettono di individuare e pesare all'interno di una singola categoria il tipo di danno relativo alla sostanza emessa o alla risorsa usata. Vengono in questo

modo determinati dei fattori specifici da moltiplicare per il peso della sostanza emessa o consumata.

Per la categoria Human Health vengono eseguite le seguenti analisi:

- *fate analysis*, che lega la sostanza emessa alla variazione della sua concentrazione nel tempo;
- *exposure analysis*, che lega questa variazione di concentrazione ad una dose;
- *effect analysis* che lega la dose di emissione agli effetti sulla salute umana come il numero e la tipologia di tumore e gli effetti respiratori;
- *damage analysis*, che lega gli effetti sulla salute al numero di anni vissuti dall'uomo ammalato (YLD) e al numero di anni di vita persi (YLL).

Per la categoria Ecosystem Quality vengono considerati due tipi di impatto: le emissioni tossiche (*ecotoxicity*) e quelle che modificano l'acidità e i livelli nutritivi (*acidification and eutrophication*). Per tali categorie di impatto si segue la seguente procedura di analisi:

- *fate analysis*, che lega le emissioni alle concentrazioni;
- *effect analysis*, che lega le concentrazioni alla tossicità, ai livelli di acidità o all'incremento delle sostanze nutritive disponibili;
- *damage analysis*, che collega questi effetti all'incremento potenziale della scomparsa di piante.

Inoltre considera l'uso e la trasformazione del territorio (*land use*), sulla base di dati empirici relativi alla qualità degli eco-sistemi, in funzione del tipo di uso del territorio e del valore della sua area.

Per la categoria Resources vengono seguite due fasi:

- *resource analysis*, che lega l'estrazione di una risorsa alla riduzione della sua concentrazione;
- *damage analysis*, che lega la minore concentrazione di risorse all'aumento dell'energia spesa per la loro estrazione in futuro.

## **Human Health**

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) ha dichiarato che la salute “*non è semplicemente assenza di malattie o infermità, ma riflette uno stato di completo benessere fisico, mentale e sociale*”; essa afferma inoltre che “*la salute ambientale degli uomini include sia gli effetti patologici delle sostanze chimiche, della radioattività e di alcuni agenti*

*biologici, sia gli effetti, spesso indiretti, dell'ambiente fisico, psicologico, sociale ed estetico comprendendo il problema degli alloggi, lo sviluppo urbano, l'uso del territorio ed i trasporti".* Nella metodologia *Eco-indicator 99* si esaminano solamente alcuni aspetti di un problema così sfaccettato ed in particolare:

- si considereranno esclusivamente le emissioni antropogeniche in atmosfera, idrosfera e geosfera, escludendo le condizioni nei posti di lavoro e negli alloggi, gli incidenti stradali, i danni causati dall'abuso di alcol e del fumo, ecc.;
- i problemi di salute derivanti da disastri naturali, eruzioni vulcaniche, microrganismi non riguardano questo studio;
- non verranno considerati gli aspetti economici legati al benessere umano.

Da queste limitazioni consegue che la definizione di Human Health contemplata nell'LCA è molto più restrittiva di quella considerata dal WHO: per salute umana si intende in questo contesto l'assenza di morti premature, malattie o irritazioni causate da emissioni derivanti da processi agricoli o industriali nell'aria, nell'acqua e nel suolo.

Se si vuole quantificare il danno arrecato alla salute umana è necessario considerare una scala che sia capace di misurare la salute della popolazione; essa dovrà comprendere il numero di individui interessati dal problema, il tempo sottratto a ciascun individuo da infermità o morte prematura e la gravità della malattia.

A livello internazionale, un indicatore in grado di stimare il carico totale da attribuire a ciascun problema di salute, è stato sviluppato da Murray nel "*Global Burden of Disease Study*". Esso esprime il numero di *Disability-Adjusted Life Years* (DALYs), misurando il peso di una infermità dovuta ad una invalidità o a una morte prematura attribuibile a ciascuna malattia. Il concetto di DALY distingue gli anni trascorsi da ammalato (YLD: *Years Lived Disabled*) da quelli persi per morte prematura (YLL: *Years of Life Lost*). Sono stati stabiliti valori che rappresentino il grado di infermità o sofferenza associato a ciascun disturbo, essenziali per il confronto tra le diverse malattie. In base a tali valori si è istituita una gerarchia di sette classi di infermità a ciascuna delle quali si associa un peso che va da 0 (salute perfetta) a 1 (morte).

Per calcolare il danno che deriva dalla ciascuna malattia, i DALY vengono determinati come prodotto tra il *rating* di quella malattia (coefficiente di infermità) e gli anni di vita persi a causa della stessa, ottenuti da studi statistici.

Nello sviluppare la metodologia non è stata valutata la differenza fra danni immediati e danni futuri, mentre si è inserito un peso per tenere conto del fatto che la salute umana assume una

diversa importanza a seconda dell'età dell'individuo ammalato: tale valore cresce dalla nascita fino all'età di 25 anni alla quale comincia un lento decremento.

### Il danno alla salute umana causato da sostanze cancerogene

Rintracciare un legame di causa-effetto tra l'esposizione ad una sostanza e l'incidenza di tumori sulla popolazione umana è un compito molto complesso che richiede considerazioni su dati sperimentali e studi epidemiologici.

L'Associazione Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha sviluppato un sistema di classificazione delle sostanze basato sul maggiore o minore effetto cancerogeno riscontrato sugli animali e sull'uomo. Il calcolo del danno alla salute umana è realizzato attraverso una lista di sostanze, funzione della prospettiva culturale adottata, e si sviluppa in tre fasi distinte:

- *Fate analysis*: dall'emissione alla concentrazione;
- *Effect analysis*: dalla concentrazione ai casi di cancro per kg di emissione;
- *Damage analysis*: dai casi di cancro ai DALYs per kg di emissione.

### Il danno alle vie respiratorie

Risulta evidente dagli studi epidemiologici il fatto che alcune sostanze inorganiche e numerose polveri possano essere ritenute responsabili di danni all'apparato respiratorio. Tra di esse le principali sono: particolato (PM10 e PM2.5), nitrati e solfati, SO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub>. La presenza di tali sostanze nell'ambiente non deriva sempre da emissioni dirette in atmosfera poiché esse possono formarsi anche indirettamente attraverso reazioni chimiche tra altri inquinanti, denominati a tale proposito primari (polveri sospese TSP, NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>) e per questo anch'essi da considerare nella *Fate analysis*.

La procedura di previsione del danno è simile a quella sviluppata per le sostanze cancerogene ma, in questo caso, non completamente dimostrabile a causa del fatto che, seppure la stima dei DALYs possa essere molto precisa, gli effetti sulla salute umana risultano piuttosto variabili. In questa parte dello studio è stato usato un approccio epidemiologico il quale, pur presentando limitazioni dal punto di vista della ricerca di nessi di causalità e correlazione, risulta comunque migliore di uno che privilegi gli effetti tossicologici, i quali non sono in grado di produrre risultati apprezzabili alle basse concentrazioni ambientali.

Il calcolo del *fate factor* adotta un modello che considera dati circa il tempo di residenza nell'atmosfera e l'altitudine raggiunta. Le funzioni che legano l'esposizione alle sostanze con la malattia sono determinate utilizzando le informazioni sulle concentrazioni ambientali, la

densità di popolazione nell'area dello studio, i ricoveri ospedalieri per affezioni respiratorie e il rischio relativo. Esse sono da considerarsi relazioni molto più incerte e sperimentali rispetto al caso delle sostanze cancerogene.

### I danni causati dai cambiamenti climatici

Esistono diversi problemi da affrontare nel modellare le conseguenze sulla salute derivanti dall'effetto serra:

- i cambiamenti di clima non comportano danni immediati rilevabili nel presente ed è necessario affidarsi a scenari più o meno probabili;
- la vulnerabilità dei sistemi dipende dallo sviluppo dell'economia e della società;
- le variazioni di temperatura possono apportare anche effetti positivi sulla salute;
- il danno non può essere confinato: le emissioni di gas serra in Europa causano danni in tutto il pianeta.

Risultato di queste considerazioni è l'ampio disaccordo sulle conseguenze reali dell'effetto serra. Nello sviluppo del modello ci si è perciò dovuti confrontare con un problema che potrebbe causare danni molto seri e con l'altissima incertezza che essi si possano verificare o meno. Il danno alla salute umana dovuto ai cambiamenti climatici avviene attraverso numerose vie d'impatto. Nello sviluppo della metodologia non è stato possibile comprendere tutti gli aspetti, poiché molti di questi presentano delle incertezze troppo ampie per poter essere quantificati; nel metodo *Eco-indicator99* sono stati perciò considerati esclusivamente gli effetti meno incerti.

Nel caso specifico si è interessati a conoscere l'incremento del danno per tonnellata di gas serra (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) emessa; per questo si è utilizzato un procedimento che calcola il danno incrementale dovuto ad un flusso addizionale di 1 Mt all'anno dei tre gas serra specificati includendo le morti causate da malattie infettive trasmissibili attraverso vettori, le affezioni cardiovascolari e respiratorie dovute a variazioni della temperatura media, ed i disagi procurati da emigrazioni di popolazioni dalle zone costiere sommerse dall'innalzamento del livello dei mari. Tutti questi parametri, trasformati in seguito in DALYs/tonnellata, sono valutati per tutte e nove le regioni del mondo, poiché, le emissioni europee contribuiscono ad un danno di livello globale.

È necessario sottolineare quanto sia difficile quantificare fino a che punto gli effetti riscontrati dipendano da cambiamenti climatici o possano essere associati ad altri fattori igienici e sociali.

### Il danno provocato dalle radiazioni ionizzanti

Questa sezione considera il danno arrecato alla salute umana da rilasci uniformi di materiale radioattivo nell'ambiente. Nello studio non sono incluse le emissioni radioattive derivanti dall'estrazione di alcuni tipi di sostanze o da rilasci dovuti ad eventi accidentali.

Il modello inizia la valutazione partendo da un rilascio espresso in *Becquerel* [Bq], unità pari all'attività di una sostanza che subisce un decadimento al secondo.

Il *fate model* utilizzato è basato sulle emissioni atmosferiche e gli scarichi di liquidi radioattivi non accidentali nella produzione di energia in Francia. I dati circa i rilasci e le condizioni ambientali circostanti sono riferiti alla realtà francese. Il modello impiega un orizzonte temporale molto lungo (100.000 anni) in modo da poter includere tutti gli effetti dei diversi percorsi possibili di esposizione.

Nell'*Exposure analysis* si stima quale sia la dose realmente assimilata dagli individui in base al livello di radioattività riscontrato nell'analisi precedente. La misura della dose effettiva viene valutata in *Sievert* [Sv], unità di misura dell'equivalente della dose assorbita di una qualsiasi radiazione ionizzante, che abbia la stessa efficacia biologica di 1 *Gray* [Gy] di raggi x. Allo scopo di collegare le emissioni [Bq] all'assorbimento di energia [Sv] sono stati definiti i due percorsi attraverso i quali si manifesta l'esposizione a sostanze radioattive, suddividendo i rilasci in atmosferici e liquidi.

La stima del danno si concentra sugli effetti cancerogeni ed ereditari dell'esposizione alla radioattività, i quali sembrano essere i più significativi. Due scopi sono ritenuti fondamentali: valutare il numero di casi che si manifestano come risultato di una esposizione e stabilire il numero di DALYs per ciascun caso.

### Il danno causato dall'assottigliamento dello strato di ozono

La dimensione della fascia di ozono nella stratosfera sta raggiungendo i livelli più bassi mai apprezzati dall'inizio delle misurazioni, nel 1970. La ragione principale dell'assottigliamento è l'incremento delle concentrazioni di cloro e bromo dovute al rilascio di sostanze, come i CFC, con un lunghissimo tempo di residenza nell'atmosfera.

Il ridotto potere filtrante dell'ozono associato all'assottigliamento comporta un incremento delle radiazioni UV.

Ad oggi la produzione e il rilascio di composti del cloro e del bromo, aventi un lungo tempo di residenza in atmosfera, continua ancora, seppure in maniera ridotta. Forti del successo

ottenuto nella limitazione delle emissioni si potrebbe pensare che questo argomento, nel lungo periodo, non costituirà più un elemento di preoccupazione per le sorti del pianeta: ciò non è vero, in realtà tutte le emissioni, seppure ridotte, contribuiscono a procurare danni alla salute umana. La modellizzazione del danno dovuto all'assottigliamento dello strato di ozono ha incontrato diverse difficoltà:

- molti studi hanno analizzato gli effetti della riduzione delle emissioni, ma nessuno studio ha mai valutato il risultato del rilascio addizionale di 1 kg di CFC;
- non è ancora chiaro come e fino a che punto l'assottigliamento dello strato di ozono contribuisca al danno sul sistema immunitario e sull'ecosistema;
- è relativamente semplice per l'uomo evitare l'esposizione ai raggi solari attuando cambiamenti nei comportamenti abituali;
- l'incremento delle radiazioni UV dipende dalla latitudine;
- alcuni effetti riguardano solo una parte dell'umanità (solo le persone con pelle chiara, ad esempio, soffrono di disturbi associabili all'esposizione ai raggi UV).

Le sostanze contenenti cloro diluite nella troposfera raggiungono la stratosfera in un tempo medio di circa quattro anni, dove contribuiscono, attraverso note reazioni chimiche, alla disgregazione dello strato di ozono. Il tempo di residenza nell'atmosfera (variabile tra 1 e 1.000 anni) diventa perciò un fattore di discriminazione estremamente importante: sostanze con un valore inferiore ai quattro anni non riescono a spingersi fino alla stratosfera e non costituiscono perciò un pericolo per l'incolumità della fascia di ozono. È chiaro come la valutazione del danno dipenda fortemente dall'orizzonte di tempo considerato, in quanto, stabilito un limite, saranno ignorati tutti i composti potenzialmente dannosi con una vita in atmosfera superiore.

Nel procedere alla valutazione, non avendo trovato *fate models* adatti allo scopo, si è scelto di ricavare il *fate factor* da uno studio sugli effetti di un emendamento di Londra. In esso la produzione residua di CFC11 è correlata alla corrispondente concentrazione in atmosfera. Per tutte le altre sostanze sono stati utilizzati dei fattori di equivalenza. La radiazione UV che raggiunge la terra causa effetti discordanti sulla salute umana. Alle conseguenze positive, come la formazione della vitamina D, si associano effetti negativi come scottature, invecchiamento della pelle, danni alla vista, tumori della pelle e della cataratta.

L'impatto sulla crescita nei casi di queste malattie è quantificato in termini di *Biological Amplification Factor* (BAF), definito come l'incremento percentuale di incidenza risultato di un aumento dell'1% di radiazione UV nell'ambiente. Un altro valore è il *Radiation*

*Amplification Factor* (RAF) che esprime in percentuale l'incremento di radiazione UV rapportato alla frazione di assottigliamento dello strato di ozono.

## **Ecosystem Quality**

Nonostante numerosi trattati e dichiarazioni internazionali abbiano cercato di stabilire le condizioni in grado di descrivere il benessere di un ecosistema, gli ecosistemi rimangono comunque strutture molto eterogenee e complesse da monitorare.

Un metodo per descriverne la qualità è quello di considerare i flussi di massa e di informazioni che lo attraversano. In un buon ecosistema, infatti, tali flussi non sono in alcun modo intralciati da attività di origine umana.

Nella stesura della metodologia di valutazione si è deciso di considerare esclusivamente la trasmissione di informazioni a livello di specie: ciò significa che si è assunta la diversità delle specie come un valore adeguato alla rappresentazione della qualità dell'ecosistema. Quasi tutte le specie possono essere affette dall'influenza delle attività antropiche, quindi essendo impossibile effettuare un monitoraggio che le comprenda tutte, sarà necessario scegliere i gruppi di specie che meglio rappresentano la qualità dell'ecosistema. Per questo motivo si distingue:

- la completa ed irreversibile estinzione della specie;
- la reversibile o irreversibile scomparsa o livello di stress di una specie in una delimitata zona durante un certo intervallo temporale.

Il primo tipo di danno è probabilmente il più importante nella qualità dell'ecosistema, ed è tuttavia estremamente difficile da modellare nel contesto dell'LCA. È necessario infatti considerare che l'estinzione completa di una specie è un fenomeno che si verifica come conseguenza di un insieme di diversi fattori, ciò implica che non sarà il ciclo di vita di un solo prodotto a causare l'estinzione, ma l'insieme di numerosi cicli di vita.

Nella seconda opzione si assume che i danni causati dal ciclo di vita di un singolo prodotto provocano un danno temporaneo all'equilibrio dell'ecosistema, questo potrà poi essere una delle cause che insieme ad altri fattori potranno provocare la completa estinzione di una specie.

La misura del danno su un Ecosistema può essere esprimibile mediante la relazione:

*Diminuzione relativa del Numero di Specie (espressa in frazione) · Area · Tempo*

Sfortunatamente non si è riusciti ad ottenere un unico parametro che rappresentasse l'effetto su un gruppo di specie; si utilizzano, perciò due differenti espressioni:

- *Potentially Affected Fraction* (PAF): è un parametro utilizzato per valutare il danno arrecato da sostanze tossiche all'ecosistema. Si applica per lo più ad organismi molto semplici, sia acquatici, sia terrestri. Può essere interpretato come la frazione percentuale di specie esposta ad una concentrazione equivalente o superiore al NOEC (*No Observed Effect Concentration*). È perciò una misura dello stress tossico, non ancora realmente diventato un danno.
- *Potentially Disappeared Fraction* (PDF): viene usato per la valutazione dell'effetto di acidificazione, eutrofizzazione e uso del territorio sulla popolazione di piante vascolari in un certa area. Può essere interpretato come la frazione percentuale di specie che hanno una alta probabilità di non sopravvivere nell'area considerata, a causa di sfavorevoli condizioni di vita. In maniera totalmente speculare si definisce il POO (*Probability of Occurrence*), per cui  $PDF=(1-POO)$ .

Ciò implica che non esiste una unica categoria di danno per la determinazione della qualità dell'ecosistema, al pari di quella utilizzata per la sfera Human Health. Si presentano quindi due diversi problemi:

- si utilizzano due diversi gruppi di specie come rappresentativi dell'ecosistema nella sua totalità: le piante vascolari per l'acidificazione, l'eutrofizzazione e l'uso del suolo, e un'ampia serie di organismi acquatici e bentonici per gli effetti tossici.
- si utilizzano due livelli di danno diversi per determinare l'effetto sull'ecosistema, il livello per il quale le specie sono irreparabilmente danneggiate e il livello per il quale le specie si estinguono.

Le specie superiori come rettili, uccelli e mammiferi non sono state incluse. La valutazione sarebbe risultata troppo gravosa a causa dei loro comportamenti difficilmente schematizzabili in un modello. È evidente, tuttavia, quanto la sopravvivenza degli animali sia legata a quella degli organismi più semplici, i quali provvedono a fornire l'habitat ideale ed il sostentamento, attraverso il cibo, agli organismi più complessi.

Le differenze tra PAF e PDF non consentono di esprimere il valore del danno inferto alla qualità dell'ecosistema mediante una semplice somma dei due valori. Il problema più rilevante è la differenza tra i livelli di danno per i quali le specie risultano affette e quello per il quale le specie si estinguono.

### Il danno all'ecosistema causato da sostanze tossiche

La *fate analysis* produce come risultato un legame tra l'emissione di una sostanza in aria, acqua, suolo agricolo e industriale e una concentrazione nelle acque superficiali e di falda.

Il metodo utilizzato per stimare il danno è fondato su di un algoritmo; esso fornisce come risultato la frazione di specie esposta ad una concentrazione maggiore o uguale al NOEC. Il percorso principale di esposizione sono le acque superficiali per gli ecosistemi acquatici, e le falde acquifere per i terrestri, mentre l'assunzione tramite il cibo è considerata irrilevante.

Per ciascuna sostanza è possibile stimare una curva rappresentativa della risposta degli organismi alle diverse dosi di sostanza.

Il problema da affrontare, in questo tipo di valutazione, è che il danno attribuibile ad un incremento marginale della concentrazione di una specifica sostanza dipende non solo dall'entità dell'incremento stesso, ma anche dal livello di danno attualmente raggiunto nell'ecosistema, dovuto alla combinazione delle sostanze già presenti nell'ambiente.

### Il danno all'ecosistema causato da acidificazione ed eutrofizzazione

Acidificazione ed eutrofizzazione sono fenomeni causati da deposizioni di sostanze inorganiche come solfati, nitrati e fosfati. Le deposizioni, che derivano principalmente da emissioni atmosferiche o da immissioni dirette nell'acqua, hanno come effetto principale la variazione dei livelli di nutrienti e dell'acidità del suolo.

Mentre nel caso delle sostanze tossiche era sufficientemente chiaro il legame tra l'incremento della concentrazione di una sostanza e il livello di danno arrecato, in questo contesto la questione risulta molto più delicata e sottile.

Per la maggior parte delle specie di piante è stato definito un livello ottimale di combinazione tra i livelli nutritivi e l'acidità del suolo. La modificazione dei livelli di nutrienti e di acidità da questi valori ottimali non comporta un danno visibile e concreto, ma soltanto uno squilibrio fra le popolazioni delle diverse specie presenti nell'ecosistema considerato. Il problema è perciò stimare fino a che punto uno scostamento dell'equilibrio fra le specie possa essere valutato come un danno, e attribuire a ciascuna specie un giudizio gerarchico distinguendo tra quelle più o meno "desiderabili". Nello sviluppare la metodologia è stata stilata una lista di specie target per più di 40 ecosistemi, utilizzando un criterio di scelta che privilegiasse la tipicità e la rappresentatività di ciascuna specie all'interno del proprio ecosistema.

Si è quindi in grado di monitorare gli effetti delle deposizioni su queste specie target; questo può essere fatto solamente per alcuni ecosistemi, di qui la necessità di integrare il modello con un GIS (*Geographic Information System*). Selezionando l'ecosistema 'progettato' in ogni cella, sarà possibile modellare gli effetti della deposizione in termini di PDF tramite le specie target presenti nella cella considerata.

Per l'analisi del danno, si ricorre a un particolare *fate model*, basato sui preesistenti livelli caratteristici di ogni cella. Nel modello utilizzato si tengono in considerazione solamente i cambiamenti nelle aree naturali; le variazioni di acidità e di livelli nutritivi nelle aree agricole sono considerate poco rilevanti.

Al momento un problema è dato dalla mancanza di un modello che quantifichi l'eutrofizzazione e l'acidificazione nei modelli acquatici. Finora l'unico modello utilizzabile è in grado di creare una relazione tra l'incremento di deposizione e la variazione del PDF per le piante nel territorio olandese. Soluzione temporanea è quindi quella di assumere che le aree naturali olandesi siano caratterizzate da un livello di sensibilità paragonabile a quelle europee. Naturalmente questa ipotesi comporta un certo numero di errori dovuti alle particolari caratteristiche geo-morfologiche del territorio olandese.

#### Il danno all'ecosistema causato dal land use

L'impatto sugli ecosistemi a seguito dei cambiamenti nello sfruttamento del territorio è certamente molto significativo, soprattutto in molte parti dell'Europa. Lo studio dell'impatto risulta estremamente delicato poiché tali cambiamenti non inducono effetti localizzati esclusivamente nell'area in cui si verificano, ma possono coinvolgere anche le regioni limitrofe. Inoltre sarà necessario distinguere tra occupazione permanente del territorio e trasformazione.

Diversamente dagli altri modelli utilizzati, in questo caso si utilizzeranno esclusivamente dati sperimentali, come osservazioni sul numero delle specie presenti, oltre ad informazioni provenienti da sperimentazioni di laboratorio o simulazioni computerizzate.

Questi aspetti influenzano in modo rilevante il modello:

- il numero di specie osservato è il risultato dell'influenza di una serie di fattori, quali la concentrazione delle sostanze tossiche, il livello di acidità o di nutrienti, il cambiamento di clima, ecc. Questo implica che non è possibile separare gli effetti dei cambiamenti dell'uso del suolo dalle altre categorie di impatto;

- esistono diversi tipi di copertura del suolo, e per ciascun tipo il numero di specie presenti può variare ampiamente nelle diverse zone d'Europa;
- la disponibilità di informazioni provenienti da osservazioni sul campo è un problema sostanziale per due motivi:
  - vi sono sufficienti informazioni solo per pochi tipi di uso del suolo;
  - i tipi di uso del suolo per cui sono disponibili le informazioni non sono sempre adattabili con facilità alle applicazioni pratiche dell'LCA.

### **L'esaurimento delle risorse**

La categoria di danno "*Resources*" è stata introdotta per la prima volta con la nuova versione della metodologia. Diversamente dalle altre categorie di danno non è stato possibile trovare uno standard di valutazione internazionalmente accettato che potesse esprimere il danno arrecato, perciò si è dovuto sviluppare un approccio del tutto originale:

- nella prima parte della valutazione è modellizzato il decremento della concentrazione della risorsa a causa dell'estrazione di materiale grezzo;
- nella seconda, le concentrazioni decrescenti vengono collegate al concetto di "*surplus energy*".

Con il termine risorse si è soliti indicare le risorse minerali, i materiali sfusi (sabbia, ghiaia, ecc.), le risorse energetiche, le risorse rinnovabili, le risorse ambientali (suolo, aria e acqua), le risorse biologiche (come la biodiversità) e prodotti naturali.

In generale, tre sono stati i problemi affrontati durante lo sviluppo della metodologia:

- l'ammontare delle risorse è fortemente correlato allo sforzo erogato per l'estrazione;
- fino ad un certo punto, la maggior parte delle risorse sono sostituibili;
- alcuni tipi di risorse non sono consumate, nel senso che non scompaiono dopo l'uso.

Si distinguerà allora, tra risorse dissipative e non-dissipative. Il modello sviluppato avrebbe dovuto rispondere ad alcuni di requisiti:

- non basarsi sul quantitativo di risorse rimaste, poiché è impossibile determinare una quantità senza definire una qualità della risorsa richiesta. Quindi, nella valutazione, il fattore determinante non è la quantità bensì la qualità della risorsa;
- non basarsi su scenari futuri, impossibili da predire con una certa significatività;
- riflettere la vera ragione per la quale l'umanità si preoccupa del consumo di risorse minerali e fossili.

Il metodo proposto tiene in considerazione il fatto che, se la qualità di una risorsa si riduce, dall'altra parte, cresce lo sforzo per l'estrazione della risorsa rimanente. Si sa che l'umanità tende ad estrarre per prime le risorse di qualità migliore, quindi, per ogni kg di risorsa utilizzata, decresce la qualità delle risorse rimanenti e, dunque, aumenta lo sforzo necessario alle successive estrazioni. Il decremento della qualità di una risorsa ed il corrispettivo incremento dello sforzo futuro necessario all'estrazione sono i parametri utilizzati per la valutazione del danno alle risorse.

A tutto ciò va aggiunto il fatto che i processi di formazione delle risorse minerali e fossili sono completamente differenti, pertanto la modellizzazione avverrà separatamente:

- per le risorse minerali il parametro che ne determina la qualità è la concentrazione;
- per le risorse fossili il parametro è lo di sforzo di estrazione.

Il modello presenta alcuni punti deboli:

- tutti i minerali vengono considerati parimenti importanti per l'umanità;
- non è considerata la possibilità di sostituzione di un minerale con un altro; ma anche alcune vantaggi fondamentali:
- il modello non dipende direttamente dalle stime di consumi annuali, fortemente influenzate da riciclo, sostituzione o fattori di congiuntura economica;
- l'incremento atteso nello sforzo di estrazione di una risorsa sembra essere un concetto che riesce a riflettere le reali preoccupazioni dell'umanità.

La valutazione del danno causato dall'esaurimento dei minerali e dei combustibili fossili avviene attraverso il concetto di *surplus energy*. Esso è definito come la differenza fra l'energia necessaria attualmente all'estrazione di una risorsa e quella indispensabile in un istante futuro. Si calcola il surplus di energia, valutato in [MJ], che sarà necessario per estrarre 1 kg di materiale nel momento in cui il consumo di quel materiale sarà cinque volte superiore a quello estratto dall'umanità prima del 1990.

### **La stima del danno**

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

## Normalizzazione

Per la valutazione del danno occorre confrontare fra di loro i valori ottenuti per le tre categorie. Poiché essi sono caratterizzati da tre differenti unità di misura (DALY, PDF, MJ surplus), si rende necessaria la fase di normalizzazione, nella quale i risultati ottenuti saranno rapportati ad un medesimo valore di riferimento.

Il valore di riferimento può essere scelto con modalità differenti, ma, solitamente, esso rappresenta la somma di tutte le emissioni e le estrazioni di risorse riferita ad un certo territorio, in un dato periodo di tempo. Per la determinazione dei fattori peso della normalizzazione delle categorie Human Health e Ecosystem Quality il metodo degli *Eco-indicator99* segue la seguente procedura:

- esegue l'LCA calcolando il danno dovuto alle emissioni, alle radiazioni e all'uso del territorio riferendosi a tutta Europa nel periodo di un anno;
- calcola, per ogni categoria di impatto, la somma dei danni relativi ai quattro compartimenti di emissione considerati (aria, acqua, suolo industriale e agricolo);
- valuta, per ogni categoria di danno, il danno totale, somma dei danni di ciascuna categoria di impatto;
- divide il valore totale di ciascuna categoria di danno per il numero di cittadini europei, ottenendo il danno medio subito dal cittadino europeo in un anno;
- assume l'inverso di tale valore come il fattore peso della normalizzazione delle categorie di impatto afferenti la categoria di danno considerata.

Per la determinazione dei fattori peso della normalizzazione della categoria *Resources* il metodo degli *Eco-indicator99* procede, suddividendo le due categorie di impatto, secondo il seguente schema:

### Minerali

- considera i dati di consumo dei minerali negli USA;
- divide tale valore per il numero degli abitanti USA ( $266 \times 10^6$ ) e lo moltiplica per il numero di abitanti dell'Europa;
- calcola il surplus di energia necessario per estrarre 1 kg di ciascun minerale nel momento in cui la quantità estratta sarà cinque volte quella estratta fino al 1990;
- moltiplica il surplus unitario per il consumo dei minerali del cittadino europeo.

### Combustibili fossili

- considera i dati di consumo dei combustibili fossili in Europa;
- divide tale valore per il numero degli abitanti dell'Europa;
- calcola il surplus di energia necessario per estrarre 1kg di ciascun combustibile fossile nel momento in cui la quantità estratta sarà cinque volte quella estratta fino al 1990;
- moltiplica il surplus unitario per il consumo dei combustibili del cittadino europeo.

Al fine di calcolare un valore di normalizzazione unitario per la categoria *Resources* si effettuano le seguenti operazioni:

- si sommano i surplus di energia per cittadino medio europeo relativi all'estrazione dei minerali e dei combustibili fossili;
- si assume l'inverso di tale valore come il fattore peso per la normalizzazione relativo ad entrambe le categorie di impatto afferenti a *Resources*.

### **La Valutazione**

Per risolvere il problema del livello di scientificità richiesto dallo studio del LCA e quindi del livello di soggettività ammesso, il metodo degli *Eco-indicator99* segue il modello della *Cultural Theory* proposto da Thompson.

PROSPETTIVA	Salute umana	Qualità dell'ecosistema	Risorse
<b>Gerarchica</b>	40%	40%	20%
<b>Ugualitaria</b>	30%	50%	20%
<b>Individualista</b>	55%	25%	20%

**Tabella 4.0.1** Contributi in peso delle categorie di danno nelle tre diverse prospettive culturali

Per la stima dei parametri di valutazione si è costituito un campione di individui, rappresentativo delle diverse prospettive culturali, al quale sottoporre un questionario. Tale procedura non risulta statisticamente corretta a causa della scarsa dimensione del gruppo, ma l'approssimazione ottenuta risulta accettabile ai fini dello studio.

Si possono inoltre calcolare i contributi percentuali delle diverse categorie di impatto relative alle tre categorie di danno nelle tre differenti prospettive culturali (gerarchica, ugualitaria ed

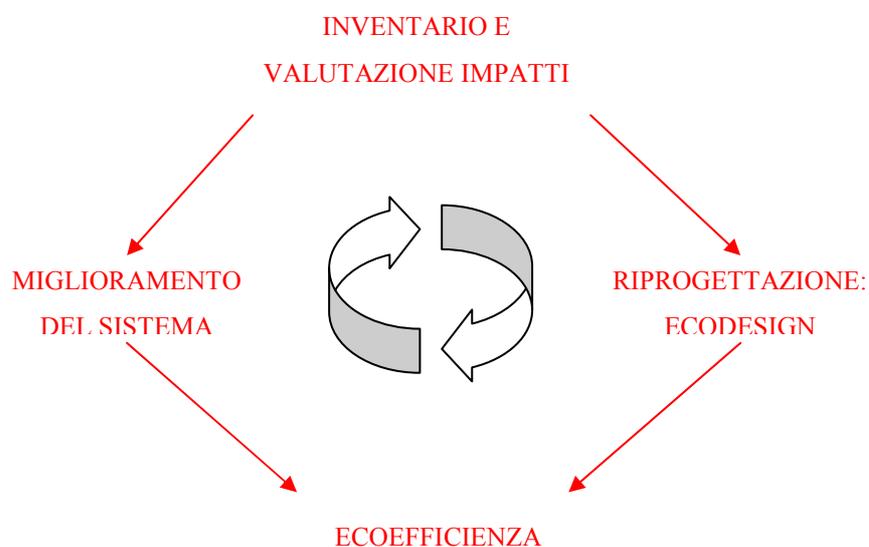
individualista). Tali contributi tengono conto, per ogni categoria di impatto, dei diversi pesi attribuiti alle emissioni e alle risorse nelle fasi di normalizzazione e valutazione.

#### 4.3.5 La quarta fase di una LCA: interpretazione e miglioramento

L'analisi del ciclo di vita può essere utilizzata per diversi scopi: dal miglioramento dei processi all'innovazione dei prodotti secondo i nuovi standard della produzione sostenibile, fino allo sviluppo di strategie di politica e comunicazione ambientale.

Il miglioramento della produzione, ovvero la scelta tra le alternative applicabili al sistema produttivo atta a massimizzare l'efficienza energetico-ambientale globale, richiede uno sforzo non indifferente a livello progettuale e organizzativo.

Di solito questa fase consente di individuare e apportare puntuali modifiche o di adottare azioni necessarie alla riprogettazione dell'intero sistema, al fine di migliorarne lo stato di fatto. Lo scopo ultimo è quello di ricercarne la massima ecoefficienza.



**Figura 4.0.8** La fase di interpretazione e miglioramento combinata con le altre fasi di una LCA allo scopo di massimizzare l'ecoefficienza

La norma ISO 14040 definisce questa quarta fase di una LCA come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti, per proporre utili raccomandazioni in conformità con gli scopi e gli obiettivi dello studio.

Non esiste, chiaramente, un codice di riferimento per attuare questa fase: l'esperienza del progettista insieme con le competenze del *Life Cycle Engineer* costituiranno la base per impostare gli studi di fattibilità degli eventuali cambiamenti.

La norma ISO 14044 contempla anche questa parte di analisi e nella definizione dell'obiettivo dell'interpretazione richiama fortemente il fatto che solo una chiara e comprensibile, completa e consistente presentazione dei risultati delle fasi precedenti è in grado di fornire quelle indicazioni utili a impostare i possibili miglioramenti del sistema in esame. In particolare, la norma indica le seguenti fasi operative:

- identificazione degli aspetti principali evidenziati dai risultati delle fasi precedenti;
- controllo ulteriore tramite analisi di sensibilità
- conclusioni evidenziando i limiti, raccomandazioni.

Oltre quindi ai risultati di inventario e quelli di valutazione degli impatti, in questa fase è opportuno soppesare il contributo delle diverse fasi del processo in esame identificandone le aree di intervento e miglioramento.

I recenti sviluppi della metodologia di *ecodesign* hanno portato all'integrazione tra i risultati dell'analisi LCA con le competenze della funzione di progettazione per la stesura del miglior progetto ecocompatibile economicamente sostenibile.



## *5. Analisi del ciclo di vita della produzione di energia da gassificazione di biomassa*

---

### **5.1 Obiettivo e campi di applicazione**

Una LCA deve essere necessariamente preceduta da un'esplicita dichiarazione degli obiettivi e delle finalità dello studio.

#### **5.1.1 Definizione degli scopi e degli obiettivi**

Il lavoro di tesi si prefigge di analizzare, secondo l'ottica del ciclo di vita, la produzione di energia da gassificazione di biomassa, inquadrando il processo nella realtà italiana ed in particolare facendo riferimento all'area del nord-est, area che ben si presta alle coltivazioni di tipo energetico. Obiettivo dello studio è la determinazione dell'impatto ambientale per la generazione di energia elettrica e termica ottenuta dal funzionamento, per 8.000 ore l'anno, di un impianto con una potenza massima installata di 45 kW<sub>e</sub>.

#### **5.1.2 Unità funzionale**

Come unità funzionale si è considerato 1 kWh<sub>e</sub>, a cui sono stati normalizzati tutti i flussi di massa ed energia presenti nell'inventario.

#### **5.1.3 Confini del sistema**

I confini del sistema vanno dalla coltivazione della biomassa fino allo smaltimento delle ceneri in discarica, passando per la generazione di energia erogata da un motore cogenerativo che sfrutta il *syngas* prodotto dal gassificatore. Non viene considerato il ciclo di vita dei macchinari impiegati nelle diverse fasi.

### **5.1.4 Qualità dei dati**

Per lo svolgimento dello studio è stato impiegato il codice di calcolo SimaPro 7.0. Esso contiene una banca dati di riferimento, modificabile secondo necessità, comprendente i dati più frequentemente richiesti sui materiali, i processi di produzione, la generazione di energia, la distribuzione e lo smaltimento dei prodotti.

### **5.1.5 Metodologia di valutazione dell'impatto ambientale**

I metodi utilizzati nello studio sono Eco-Indicator99 E e EPD (2008).

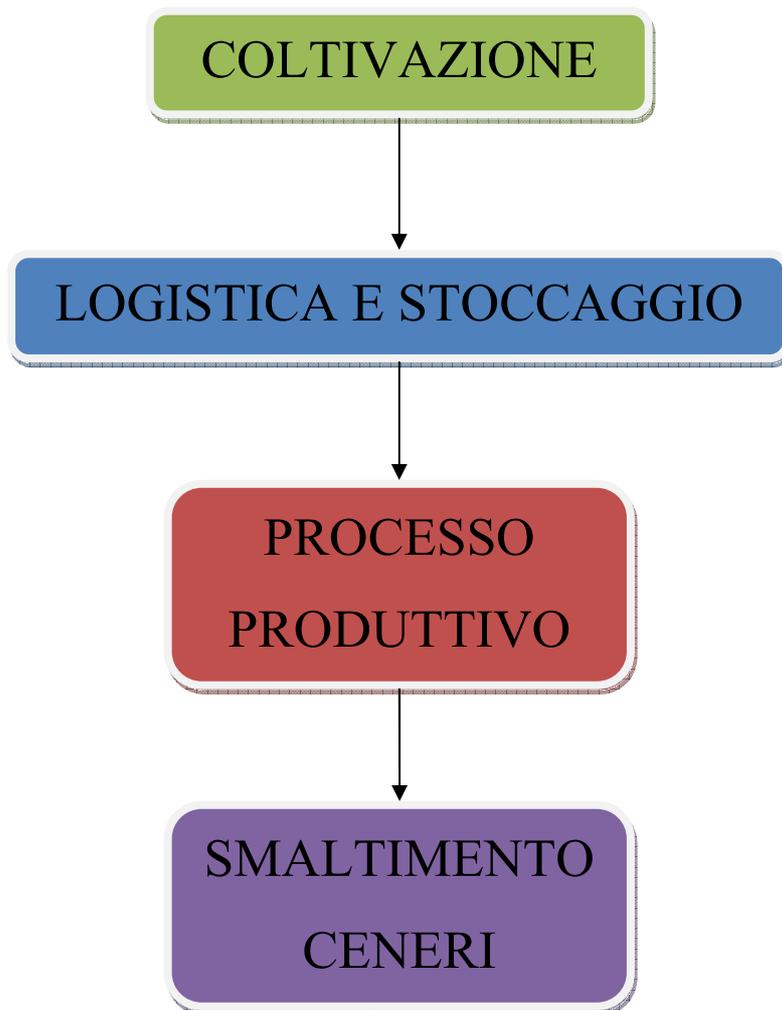
## **5.2 Analisi di inventario**

L'analisi di inventario, come spiegato nel capitolo 4, consiste nella raccolta dei dati e nelle procedure di calcolo volte a quantificare i flussi in entrata e in uscita del sistema considerato; lo scopo principale è ricostruire il percorso attraverso il quale i flussi di energia e materiali consentono il funzionamento del sistema produttivo in esame, mediante tutti i processi di trasformazione e di trasporto.

### **5.2.1 Il diagramma di flusso del processo (*Process flow-chart*)**

In figura 5.0.1 è riportata la schematizzazione delle macrofasi della filiera di produzione dell'energia elettrica tramite gassificazione di biomassa.

Ogni macrofase è poi suddivisa nelle sue diverse fasi con i relativi macchinari utilizzati e flussi di input e output. Queste verranno singolarmente analizzate, riportando anche i calcoli necessari per giungere ai valori da inserire all'interno della LCA.



**Figura 5.0.1** Rappresentazione schematica delle macrofasi che compongono il processo

Nei calcoli effettuati per determinare i valori da inserire nell'analisi LCA si è tenuto conto di ricavare un valore unitario da inserire nelle singole schede delle diverse fasi. Infatti, nelle schede dedicate ad ogni fase, è necessario indicare l'output unitario che si vuole ottenere a fronte di un certo input sempre unitario riferito all'ottenimento di quell'output: così nella fase di taglio si vuole ottenere 1 kg di cippato, avendo come input l'energia necessaria al funzionamento della falcia-trincia-caricatrice per creare quel kg di cippato; nel processo produttivo, la fase di produzione dell'energia ha come output l'ottenimento di 1 kWh e in input i valori di consumi energetici calcolati tenendo conto del fatto di ottenere 1 kWh come output; così anche per le ceneri, il trasporto avrà un valore unitario riferito all'ottenimento di 1 kg di ceneri come output.

In questo modo il computo totale sarà effettuato nella fase di assemblaggio, in cui vengono unite tutte le diverse fasi delle varie macrofasi.

## 5.2.2 La coltivazione

Il processo produttivo preso in esame, non riferendosi a nessun impianto realmente esistente, può essere ricondotto alla coltivazione di qualsiasi tipo di biomassa.

In Tabella 5.0.1 si riporta una sintesi delle specie energetiche più promettenti in Veneto per quanto riguarda la produttività, l'adattabilità pedoclimatica<sup>7</sup> e la facilità di gestione.

<b>Colture da carboidrati</b>		Mais, sorgo zuccherino, cereali vernini, barbabietola da zucchero
<b>Colture oleaginose</b>		Girasole, colza, soia
<b>Colture lignocellulosiche</b>	Erbacee annuali	Sorgo da fibra, kenaf, canapa
	Erbacee poliennali	Canna comune, miscanto, panico
	Legnose	Pioppo, salice, robinia

**Tabella 5.0.1** Colture energetiche di interesse in regione Veneto per produttività, adattabilità e gestione

La valutazione di una coltura energetica, e quindi la sua proposizione alle aziende agricole, deve considerare molteplici aspetti.

Il valore netto della produzione per unità di superficie, indipendentemente dalla destinazione finale della biomassa, è probabilmente il parametro più importante per la valutazione della competitività di una coltura agricola in un determinato territorio.

Un altro importante fattore concerne le tecniche colturali applicabili, in ragione dei diversi livelli di intensità di input: per quanto riguarda le colture energetiche non si può prescindere da tecniche che non siano contemplate in un modello di agricoltura sostenibile.

Un semplice approccio per la valutazione della valenza di una coltura tiene in considerazione il rapporto tra gli *output* e gli *input* colturali (*output/input*), e il guadagno energetico netto (*output – input*). Questo ultimo fattore risulta di maggior interesse, in quanto un rapporto seppur elevato può anche contemplare condizioni di basse produzioni, quindi con limitato interesse economico; invece, il guadagno netto fornisce un'idea dell'energia potenziale prodotta in differenti condizioni pedoclimatiche, in funzione delle diverse tecniche colturali utilizzate.

<sup>7</sup> Condizioni pedologiche e climatiche, per pedologia si intende la scienza che studia la composizione, la genesi e le modificazioni del suolo. Quindi aree coltivabili che posseggono suolo e clima differenti.

In Tabella 5.0.2 sono presentati i risultati di uno studio relativo ai bilanci energetici delle colture erbacee ed arboree ritenute più idonee ai processi di trasformazione termochimica: si evidenziano guadagni energetici notevolmente superiori nelle colture erbacee poliennali, ed in particolare della canna comune e miscanto, rispetto alle colture erbacee annuali e a quelle legnose. Quest'ultime sono comunque ritenute le migliori per quanto riguarda la qualità della biomassa ricavabile.

Una coltura, per garantirsi un inserimento favorevole in una area definita, deve soddisfare i seguenti requisiti:

- adattabilità a determinate condizioni pedoclimatiche;
- facilità di introduzione in rotazioni colturali preesistenti;
- livelli di produttività uniformi e continui sia in termini quantitativi che qualitativi;
- ricavi competitivi con le colture tradizionali;
- bilancio energetico positivo, con elevato rapporto *output/input* e guadagno energetico netto (*output – input*);
- tecniche di coltivazione in armonia con il concetto di agricoltura sostenibile;
- resistenza alle maggiori avversità biotiche ed abiotiche;
- disponibilità di materiale genetico (semi, rizomi, talee);
- parco macchine appropriato alla coltura (in particolare per le operazioni di raccolta).

Specie	Sostanza secca	P.C.I	Output	Output/Input	Energia netta Output- Input
	[t/ha]	[GJ/t]	[GJ/ha]		[GJ/ha]
<b>Erbacee annuali</b>					
Sorgo da fibra	20-30	16,7-16,9	334-507	13-39	309-494
Kenaf	10-20	15,5-16,3	155-326	6-25	130-313
Canapa	8-15	16,0-18,0	128-270	5-20	119-227
Mais	8-15	16,5-16,8	132-252	5-19	127-233
<b>Erbacee poliennali</b>					
Miscanto	15-30	17,6-17,7	264-531	12-66	242-523
Canna comune	15-35	16,5-17,4	247-609	11-76	225-601
Panico	10-25	17,0-17,4	170-435	8-54	148-427
<b>Arboree (SRF)</b>					
Pioppo	9-20	17,8-19,3	160-386	10-35	144-375
Salice	10-15	17,8-18,4	178-276	11-25	162-265
Robinia	10-13	17,8	178-231	11-21	162-220

**Tabella 5.0.2** Principali colture erbacee ed arboree ritenute idonee ai processi di trasformazione termochimica.

Gli input considerati variano da 13 a 25 e da 8 a 22 GJ/ha/anno, rispettivamente per le colture erbacee annuali e poliennali; 11-16 GJ/ha/anno per le SRF (ci si riferisce a ceduzione annuale). I dati sono in genere riferiti a prove parcellari e pertanto verosimilmente sovrastimati rispetto a quelli ottenibili da coltivazioni estensive e meccanizzate.

Tutte le piante producono biomassa, ma solamente alcune specie sono realmente adatte alla funzione energetica.

Le caratteristiche ideali che una specie dovrebbe possedere per essere considerata una coltura da biomassa:

- elevata efficienza nella conversione dell'energia solare (le colture a ciclo fotosintetico C4 sono più efficienti nella conversione in condizioni di elevata luminosità e temperatura);
- elevato tasso di crescita giornaliero, che deve essere mantenuto a lungo nel corso dell'anno (ad esempio, mais e frumento hanno un ciclo biologico troppo breve);
- la massa vegetale prodotta deve essere al di sopra del suolo, in quanto i costi energetici per raccogliere biomasse ipogee (ad esempio, la patata o la barbabietola) sono troppo elevati;
- una bassa concentrazione di azoto nella biomassa, in quanto la produzione di fertilizzanti azotati richiede molta energia;
- la specie dovrebbe essere perenne, in tal modo si riducono drasticamente i costi energetici per le lavorazioni annuali del terreno e per la semina;
- la specie dovrebbe avere una superficie fogliare estesa nello spazio e nel tempo, in modo da intercettare e convertire in biomassa la massima quantità di energia solare incidente;
- la biomassa alla raccolta dovrebbe possedere un basso contenuto di umidità, poiché questo diminuisce i costi energetici di trasporto e di essiccazione;
- la specie non dovrebbe essere suscettibile ad agenti eziologici, poiché i trattamenti con pesticidi o insetticidi richiedono energia, sia nella fase di preparazione industriale, sia nella fase di distribuzione in campo dei prodotti;
- per gli stessi motivi indicati al punto precedente, la specie dovrebbe essere molto competitiva con le erbe infestanti; determinante può risultare un precoce e rapido sviluppo della coltura ad inizio primavera;
- la specie dovrebbe avere un basso consumo idrico.

Ulteriori punti qualificanti di una coltura sono la facilità di reperimento del materiale di propagazione, i bassi costi energetici per il suo impianto, le caratteristiche chimico-fisiche della biomassa prodotta, la gestione delle necessarie pratiche agronomiche attraverso il parco macchine tradizionalmente presente presso le aziende agricole. Ovviamente, è difficile incorrere in una specie vegetale che risponda alla totalità di questi requisiti.

In relazione a quanto esposto, nell'ambito dell'insieme di colture dedicate lignocellulosiche, sono state identificate due colture erbacee poliennali (canna comune e miscanto) ed una coltura legnosa (pioppo a ceduzione biennale) per sviluppare un percorso di studio che porti alla definizione di un modello di filiera agro energetica in grado di garantire sostenibilità economica, valenza energetica ed esternalità ambientali positive e di rilievo, nell'ottica di contenimento del carico di elementi inquinanti (in particolare l'azoto).

L'impiego di colture dedicate per la realizzazione di filiere agri energetiche può comportare una serie di vantaggi significativi, rispetto all'uso delle altre risorse di biomassa:

- Le colture SRF possono integrare o sostituire le fonti di biomassa di origine forestale laddove non vi sia disponibilità sufficiente di risorse forestali o nelle aree rurali dove tali attività non sono particolarmente sviluppate (com'è il caso di molte regioni italiane, se si escludono le zone montane dell'arco alpino).
- Le colture SRF sono realizzate su terreni agricoli, quasi esclusivamente in pianura, facilmente accessibili ai mezzi di trasporto e vicini alle vie di comunicazione (aspetto tutt'altro che scontato nel caso di recupero di biomassa residuale di origine forestale). Questo comporta evidenti vantaggi di tipo logistico e potenziali risparmi nel trasporto della biomassa all'impianto.
- Trattandosi di colture agricole appositamente prodotte per uso energetico, le SRF consentono di pianificare l'approvvigionamento di biomassa in modo accurato, rispetto alle biomasse residuali (specialmente se di origine forestale, la cui disponibilità nel tempo è legata al periodo di esecuzione di altre attività quali il taglio dei boschi, la manutenzione degli alvei, la potatura dei frutteti, ecc.).
- Le SRF sono colture relativamente semplici da realizzare che richiedono agli agricoltori un impiego di manodopera limitato, un ridotto uso di fertilizzanti e diserbanti e pressoché alcun ricorso a pesticidi ed insetticidi.
- Le ricerche condotte negli ultimi anni sia in Italia che all'estero hanno messo a punto vari sistemi per la meccanizzazione pressoché completa di queste colture, rendendo possibile la produzione di biomassa a costi competitivi.
- La standardizzazione dei metodi di coltivazione e l'impiego di sementi o cloni selezionati permette di ottenere biomassa con caratteristiche qualitative omogenee, caratteristica molto importante per consentire il corretto funzionamento degli impianti industriali.

- Per quanto la coltivazione e la raccolta di SRF richiedano l'impiego di energia da fonti fossili, il bilancio energetico della coltura rimane fortemente positivo. Inoltre queste colture contribuiscono significativamente ad aumentare il contenuto di sostanza organica dei terreni (aspetto particolarmente desiderabile sotto il profilo agronomico) attraverso la grande quantità di biomassa fogliare che producono e che viene restituita al suolo con la caduta delle foglie.

In Italia gli impianti arborei di pioppo a ciclo breve (SRF) sono la principale coltura lignocellulosica coltivata a scopo energetico.

Rispetto alla pioppicoltura da legno tradizionale questi impianti presentano alcune differenze sostanziali. In primo luogo il ciclo di produzione più corto: nel caso della pioppicoltura da legno tradizionale le piante sono allevate a fusto singolo ed il taglio avviene una volta dopo circa 15 anni. Nella *short rotation forestry*, invece, si utilizza il metodo della ceduzione, ossia del taglio dei fusti a pochi centimetri dalla base ad intervalli periodici (turni), che possono variare da 1 a 5 anni a seconda del tipo di impianto. Successivamente ad ogni taglio le piante emettono nuovi germogli dalla ceppaia, assumendo un portamento policaule<sup>8</sup>, che vengono nuovamente tagliati al turno successivo.

La durata di un impianto SRF è di circa 10-12 anni, per cui nell'arco di questo tempo si possono effettuare diversi cicli di taglio.

La caratteristica di poter sopportare numerosi cicli di taglio è un'altra differenza significativa fra gli impianti SRF ed i pioppeti tradizionali, dovuta in primo luogo all'impiego di materiale di propagazione selezionato per questo specifico uso.

La ricerca sul miglioramento genetico condotta anche nel nostro paese ha permesso infatti di selezionare cloni di pioppo rustici, con una buona capacità di ricaccio e tolleranti allo stress provocato dai tagli ripetuti che, invece, nei cloni tradizionali di pioppo da legno o carta provocano un indebolimento delle piante ed una progressiva diminuzione della produttività dopo pochi tagli.

Un'altra caratteristica distintiva di tali SRF è la densità di impianto, molto maggiore rispetto ai pioppeti tradizionali. I primi impianti realizzati in Italia avevano densità molto alte, da 10.000 fino a 20.000 piante ad ettaro e turni di ceduzione annuali. Tuttavia le esperienze accumulate durante gli ultimi anni hanno permesso di mettere a punto un modello più adatto alla coltura del pioppo nei nostri climi, basato su turni di ceduzione biennali o triennali (in

---

<sup>8</sup> Più fusti da una sola ceppaia

certi casi anche quinquennali) e densità di impianto inferiori, pari a 6.000-10.000 piante ad ettaro.

In Italia allo stato attuale ci sono circa 5.100 ettari di piantagioni SRF, distribuite soprattutto nel Nord (Pianura padana) ed in parte al Centro.

Le ormai numerose esperienze di coltivazione del pioppo in *short rotation forestry* a livello nazionale hanno evidenziato valori di produttività molto differenti in funzione, ovviamente, del clone utilizzato, del livello di *input* alla coltura e soprattutto dell'ambiente pedoclimatico di coltivazione.

Un valore plausibile di resa media pluriennale varia dalle 15 alle 20 t<sub>ss</sub>/ha all'anno (pianura pisana), mentre rese inferiori, 12-15 t<sub>ss</sub>/ha all'anno con punte di 20, sono riportate come media nazionale. Alcune esperienze condotte in Friuli Venezia Giulia riportano produzioni medie variabili tra 10-15 t<sub>ss</sub>/ha all'anno nel caso di terreni di alta pianura dalla limitata fertilità, e 16-18 t<sub>ss</sub>/ha all'anno in terreni di bassa pianura, con maggior grado di fertilità.

Inoltre, si deve sottolineare che il legno di pioppo presenta come principale punto di forza la buona qualità come biocombustibile in relazione al limitato contenuto in ceneri ed in microelementi. Occorre comunque considerare che, nel caso di ceduzione annuale, stante la rilevante quota di corteccia della pianta, si evidenzia un più elevato contenuto in ceneri, compreso tra l'1,5% ed il 2,5%, e di alcuni microelementi che possono dar luogo a comportamenti anomali all'interno del gassificatore e a maggiori emissioni in atmosfera.

Anche per questo motivo, tendenzialmente si preferisce prolungare di un anno la turnazione di taglio delle piante (quindi biennale), affinché si possa ottenere del materiale cippato di migliore qualità.

Per queste ragioni il tipo di biomassa scelta per questo studio LCA è il pioppo a ciclo breve (*Short rotation forestry*), durata 12 anni con ceduzione biennale.

### 5.2.2.1 Descrizione botanica ed esigenze ambientali del pioppo

Le specie che si possono coltivare sono quattro: *Populus alba*, *P. nigra*, *P. deltoides* e *P. × canadensis*.

Le prime due sono spontanee in Italia; *P. deltoides* è stato introdotto dal Nord America per la coltivazione in Europa alla fine del 1700.

*P. × canadensis* è l'ibrido tra *P. nigra* e *P. deltoides*; i cloni di questo ibrido sono i più diffusi nella pioppicoltura tradizionale italiana, soprattutto nella pianura padana.

Le caratteristiche che rendono il pioppo particolarmente adatto alla SRF, riassumendo ciò che è stato scritto nel capitolo precedente, sono l'alta produttività raggiungibile in un periodo di pochi anni, la possibilità di utilizzare la propagazione vegetativa, l'ampia base genetica a disposizione, la brevità del ciclo per la selezione, la possibilità di ricaccio dopo numerosi tagli e l'uniformità del materiale prodotto.

Il pioppo è caratterizzato da un sistema radicale superficiale (la maggior parte delle radici si concentra nei primi 60-80 cm di suolo). Le foglie sono semplici, caduche ed alterne. Le piante sono dioiche<sup>9</sup>, con esemplari che portano solo fiori maschili ed altri con fiori femminili.

Il genere *Populus* presenta spesso la facoltà di riprodursi per via vegetativa: l'uso di talee per la costituzione di nuovi impianti presenta vantaggi economici e tecnici (uniformità di sviluppo delle piante) ed ha soppiantato l'uso di piantine da seme.

Per quanto concerne le esigenze termiche, i pioppi hanno bisogno di un periodo di crescita di almeno 150 giorni con temperature medie tra giugno e settembre superiori ai 14 °C.

Sono specie esigenti quanto a fertilità del suolo, disponibilità di acqua e aerazione del terreno. I terreni devono essere sufficientemente profondi (80-100 cm), con buona capacità di ritenzione idrica e con assenza di ristagno, tessitura<sup>10</sup> tendenzialmente sciolta o di medio impasto (il contenuto in limo e argilla del terreno deve essere inferiore al 50%), con buona quantità di elementi nutritivi presenti nel terreno e pH compreso tra 5,5 e 7,5.

Ottimale sarebbe l'accessibilità alla falda da parte dell'apparato radicale (100-150 cm). Le esigenze idriche del genere *Populus* richiedono precipitazioni medie annue di almeno 700 mm.

L'adattabilità ai suoli e alla disponibilità idrica varia comunque in maniera sostanziale in funzione della specie e del clone considerato.

Nella valutazione delle asportazioni effettive di elementi nutritivi e quindi delle reintegrazioni necessarie per mantenere la fertilità del terreno (stimate in 4-6 kg di N, P, K per t s.s./ha/anno), occorre considerare che il pioppo restituisce al suolo circa il 60- 80% dei nutrienti asportati, grazie alla caduta delle foglie.

Il clone che è stato considerato nell'analisi LCA è il *Populus* × *canadensis*, essendo il più diffuso nella pianura padana e avendo alta tolleranza alle avversità e malattie che potenzialmente possono incorrere nella vita utile della coltura.

---

<sup>9</sup> Indica che gli organi riproduttivi maschili (stami) e femminili (pistilli) sono portati su due piante distinte

<sup>10</sup> la tessitura o grana o granulometria è la proprietà fisica del terreno che lo identifica in base alla composizione percentuale delle sue particelle solide distinte per classi granulometriche.

### 5.2.2.2 La tecnica di coltivazione e la raccolta

In Tabella 5.0.3 si presenta una breve scheda che definisce la tecnica di coltivazione e raccolta del pioppo a turno di ceduzione biennale.

Anno	Operazioni colturali	Macchinari e mezzi tecnici
1° anno (impianto coltura)	Aratura	Aratro (lavorazione 30 cm)
	Erpicatura	Erpice (2 passaggi)
	Concimazione di fondo*	Spargiconcime (concime ternario 8-24-24, 600 kg/ha)
	Trapianto	Trapiantatrice specifica (6.600 talee/ha)
	Intervento irriguo di soccorso*	Gruppo pompa ed irrigatori
	Diserbo antigerminello	Irroratrice ( <i>Pendimethalin</i> + <i>Linorun</i> 1,3 + 0,4 kg/ha; <i>Alachlor</i> 1,4 kg/ha)
	Concimazione di copertura + sarchiatura	Sarchiatrice con tramoggia (Urea 46%, 150 kg/ha)
	Diserbo chimico localizzato	Irroratrice ( <i>glufosinate ammonio</i> 0,45 kg/ha)
	Pulizia dell'interfila	Fresatrice (2 interventi)
2°, 4°, 6°, 8° 10° anno	Trattamento insetticida*	Irroratrice (2 trattamenti) <i>Fenitrothion</i> 140 g/hl; <i>Chlorpyrifos</i> 60 [gr/hl]; <i>Cypermethrin</i> 10 gr/hl
	Raccolta	Falcia-trincia-caricatrice abbinata a carro di raccolta
	Estirpazione interfila	Erpice (1 passaggio)
	Pulizia dell'interfila	Fresatrice (1 intervento)
3°, 5°, 7°, 9°, 11° anno	Trattamento insetticida*	Irroratrice (2 trattamenti) <i>Fenitrothion</i> 140 g/hl; <i>Chlorpyrifos</i> 60 [gr/hl]; <i>Cypermethrin</i> 10 gr/hl
	Concimazione di copertura	Spargiconcime (Urea 46%, 200 kg/ha)
	Pulizia dell'interfila	Fresatrice (2 interventi)
	Diserbo chimico localizzato	Irroratrice ( <i>glufosinate ammonio</i> 0,45 kg/ha)
12° anno	Trattamento insetticida*	Irroratrice (2 trattamenti) <i>Fenitrothion</i> 140 g/hl; <i>Chlorpyrifos</i> 60 [gr/hl]; <i>Cypermethrin</i> 10 gr/hl
	Raccolta	Falcia-trincia-caricatrice abbinata a carro di raccolta
	Ripristono del terreno	Trituratore forestale (0,5 m)
	Estirpatura	Erpice
	Pulizia dell'interfila	Fresatrice (1 intervento)

\* se necessario (nell'analisi LCA verrà trascurato il trattamento insetticida)

**Tabella 5.0.3** Modello di scheda agronomica per la coltivazione del pioppo in SRF (ceduzione biennale)

Il terreno viene preparato attraverso un'aratura alla profondità di 45-50 cm per garantire l'approfondimento degli apparati radicali, seguita da affinamento (erpicatura) per preparare il letto di trapianto. Durante le operazioni di preparazione del terreno si esegue una concimazione di base utilizzando mediamente 600 kg/ha di concime 8-24-24 (la concimazione viene comunque fornita in funzione della dotazione di base del suolo in potassio e fosforo).

La messa a dimora delle talee avviene di norma a fine inverno-inizio primavera quando le temperature iniziano ad aumentare ed il terreno è ancora sufficientemente fresco per favorire un rapido attecchimento della plantula.

Il trapianto si effettua attraverso l'ausilio di una trapiantatrice a caricamento manuale con talee di circa 25-30 cm di lunghezza e 1-3 cm di diametro.

La densità adottata nel caso di turno di ceduzione biennale è di 6.600 talee/ha (interfila 2,7-3,0 m). Successivamente al trapianto è consigliabile eseguire un intervento irriguo. In copertura, si effettua una concimazione con 70 unità di N/ha.

Il controllo delle erbe infestanti è fondamentale per il successo delle piantagioni a turno breve. Subito dopo la messa a dimora delle talee è necessario intervenire, sia per il controllo delle dicotiledoni<sup>11</sup> che delle graminacee, con prodotti residuali con azione antigerminello che garantiscono un terreno libero da infestanti per i primi 30-60 giorni.

Successivamente è previsto un controllo chimico delle infestanti localizzato sulla fila, con *glufosinate ammonio*, mentre nell'interfila si effettuano una o più lavorazioni superficiali con estirpatori, erpici o frese che, oltre all'azione dissodante, permettono l'eliminazione della flora infestante.

Per quanto riguarda gli aspetti fitosanitari, al superamento delle soglie di intervento, sono previsti trattamenti insetticidi contro insetti corticicoli e xilofagi (es. *Cossus cossus*, *Cryptorhynchus lapathi*, ecc.) o defogliatori (es. *Chrysomela populi*, *Leucoma salicis*, ecc.). Per i parassiti fungini, essendo normalmente utilizzati cloni resistenti alle più frequenti patologie (*Cytospora* spp., *Discosporium populeum*, ecc.), non si necessita di specifici trattamenti.

Nel secondo anno di ogni ciclo si prevede un intervento di diserbo meccanico dell'interfila e solo in caso di necessità uno o più controlli di natura fitosanitaria.

Sempre al secondo anno, e poi a cadenza biennale, si prevede la raccolta della biomassa a fine inverno, come verrà specificato meglio in seguito.

Durante il primo anno di ogni ciclo sono previste un'estirpazione subito dopo il taglio della ceppaia al fine di eliminare il calpestio dovuto al passaggio dei mezzi impiegati nella raccolta, una concimazione con 90 unità di N/ha alla ripresa vegetativa, un diserbo sulla fila con *glufosinate ammonio* prima dell'emissione dei nuovi polloni e due controlli meccanici delle infestanti nell'interfila (estirpatore).

Il controllo delle infestanti (chimico e meccanico) è fondamentale dopo ogni ceduzione.

La raccolta si effettua con una falcia-trincia-caricatrice semovente specifica per gli impianti in SRF (cippatura su fresco). Il materiale viene così trasferito nello spazio aziendale adibito allo stoccaggio che prevede la conservazione del cippato all'aperto, oppure sotto un telo

---

<sup>11</sup> Classe di piante Angiosperme erbacee o legnose (*Dicotyledones*) il cui embrione è provvisto di due cotiledoni.

traspirante. In tali condizioni, il materiale subisce fenomeni fermentativi e degradativi che inducono a delle perdite in termini di quantità e qualità.

Questa soluzione cantieristica, che è completata da due o più rimorchi e dalle trattrici che li portano in modo da evitare i tempi morti, prevede un'organizzazione relativamente semplice e comporta un'elevata produttività; i limiti di questa soluzione sono rappresentati dal costo di acquisto piuttosto elevato della macchina falcia-trincia-caricatrice e dal relativo peso, che ne limita drasticamente l'impiego in periodi piovosi, durante i quali i terreni hanno scarsa portanza.

In alternativa alla soluzione appena descritta, esiste la possibilità di effettuare la ceduzione delle piante intere con successivo accatastamento delle stesse a bordo campo, dove possono essere ridotte a cippato in un secondo momento (cippatura su secco).

In questa seconda tipologia di cantiere le piante sono abbattute con una sega circolare portata, vengono poi concentrate a bordo campo o trasportate al centro aziendale e stoccate come tali. Durante lo stoccaggio il materiale perde lentamente umidità in maniera naturale, senza andare incontro a fermentazioni indesiderate. Successivamente, quando necessario, le piante vengono cippate.

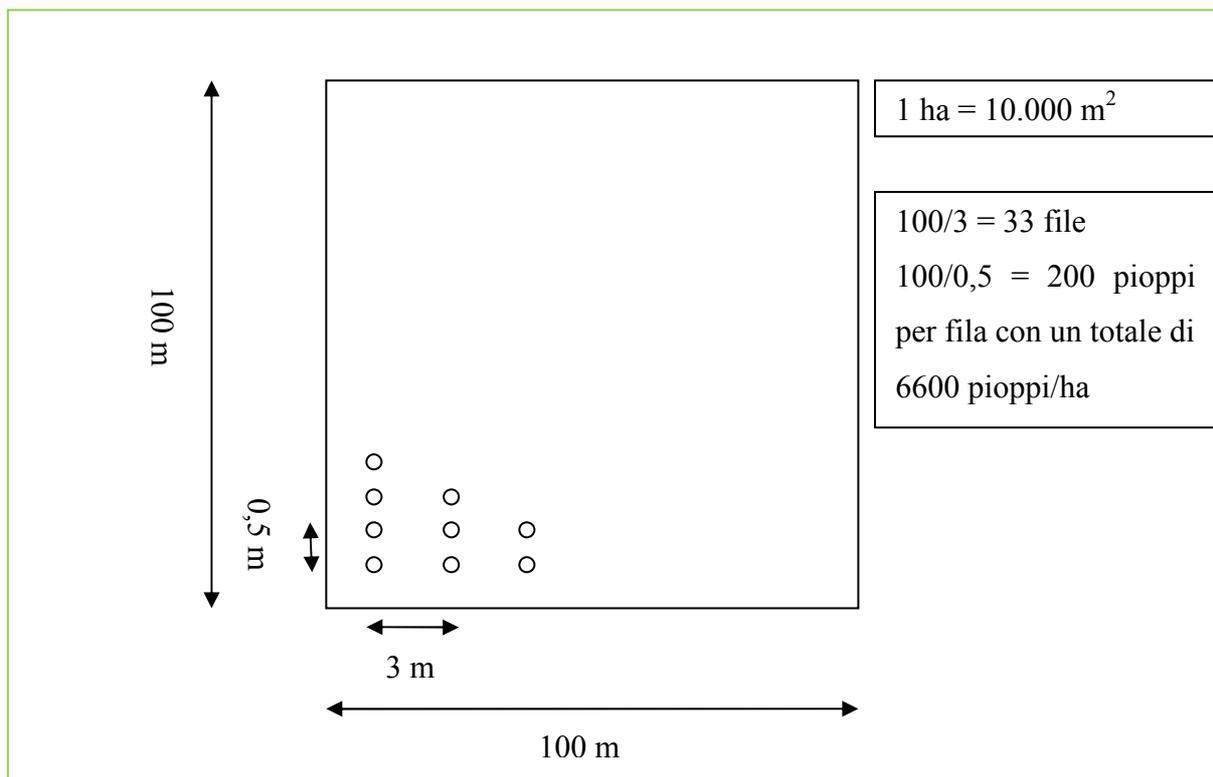
Al termine dei 12 anni previsti di vita utile del pioppeto, si eseguono le operazioni di espianto delle ceppaie, che possono essere asportate con l'impiego di speciali attrezzature (macchine fresaceppi).

Infine, il terreno viene ripristinato attraverso passaggi di estirpatura.

### *5.2.2.3 I macchinari utilizzati e i relativi calcoli per la LCA*

Le scelte fino ad ora fatte sono:

- Il clone di pioppo: *Populus × canadensis*;
- Il tipo di impianto da costruire, vale a dire *Short rotation forestry* a ceduzione biennale;
- Il sesto di impianto, il quale, come mostrato in figura 5.0.2, viene ipotizzato con una distanza interfila di 3 metri e distanza tra i pioppi adiacenti di 0,5 metri (per un totale di 6.600 piante per ettaro)



**Figura 5.0.2** Sesto di impianto

Dopo aver calcolato gli ettari necessari alla coltivazione, in base alla taglia dell'impianto di gassificazione scelto, nel processo della coltivazione viene inserito in input da natura (risorse) il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Occupation, arable, conventional tillage**”. L'unità di misura è ha a, ettari per anni di occupazione del terreno. Nel nostro caso:

$$ha\ a = ettari \cdot 12\ anni$$

La scelta ora ricade sui macchinari agricoli utilizzati nella fase di coltivazione. Bisogna per prima cosa sottolineare che, essendo una SRF di pioppo con ceduzione biennale e avendo una vita di impianto di 12 anni, tutti i calcoli eseguiti in questa fase sono riferiti all'intera vita utile della piantagione.

Per prima cosa sono stati scelti i trattori utilizzati nelle lavorazioni agricole:

- SAME FARMALL 65 A;
- SAME FARMALL 115 A;
- SAME PUMA 170.

Grazie a questi tre modelli si riesce a svolgere tutte le mansioni necessarie alla coltura. Le caratteristiche tecniche sono riassunte nella tabella 5.0.4 e 5.0.5.



**Figura 5.0.3** Trattore CASE, modello FARMALL 65 A

MODELLO	FARMALL 65 A	FARMALL 115 A
<b>Motore</b>		
N. di cilindri/Cilindrata [cm <sup>3</sup> ]	3/2930	4/4500
Potenza nominale a 2500 giri/min [kW/CV]	48/65	83/113
Riserva di coppia secondo OECD [%]	31,6	28,9
Capacità del serbatoio carburante [l]	110	110
<b>Trasmissione</b>	12 AV + 12 RM con inversione meccanica, 40 km/h	12 AV + 12 RM con Powershuttle, 40 km/h
<b>Doppia trazione e sterzo</b>	4 RM con differenziale a slittamento limitato	4 RM con differenziale a slittamento limitato
Raggio di sterzata min [m]	5,3	5,6
<b>Impianto idraulico</b>		
Portata max. della pompa - sterzo/sollevatore e funzioni idrauliche esterne [l/min]	29/36	29/50
numero max. di distributori idraulici ausiliari meccanici	3	3
Capacità del sollevatore posteriore [kg]	3000	3565
<b>Pesi e dimensioni</b>		
Peso min. senza zavorra alla spedizione [kg]	3080	3900
Peso totale consentito [kg]	5400	6500
Altezza totale dalla sommità del tetto [mm]	2591	2690
Altezza dal centro assale posteriore al tetto [mm]	1891	1891
Larghezza min. ai parafanghi standar/ con estensione [mm]	1921/2110	1921/2110
Passo	2224	2422
Lunghezza totale standard [mm]	4200	4290
<b>Pneumatici standard</b>		
Anteriori 4 RM	11.2R24	13.6R28
Posteriori	16.9R30	16.9R38

**Tabella 5.0.4** Caratteristiche tecniche dei due trattori modello FARMALL

MODELLO	PUMA 170
<b>Motore</b>	
N. di cilindri/Tipo	6 Turbo con intercooler
Cilindrata (l)	6,7
Potenza max [kW/CV]	138/188
Capacità del serbatoio carburante [l]	330
<b>Trasmissione</b>	Full powershift 40 kph + Powershuttle
Freno di servizio	Ad azionamento idraulico, multidisco in bagno d'olio, autoregistrante
<b>Doppia trazione e sterzo</b>	Ad azionamento idraulico con sistema di gestione automatica
Angolo di sterzata [°]	55
Raggio di sterzata min, con carreggiata di 1829 mm [m]	6,1
<b>PTO</b>	Ad azionamento elettroidraulico con inserimento/disinserimento automatico
<b>Impianto idraulico</b>	
Pressione dell'impianto [bar]	215
Capacità di sollevamento max. [kg]	10460
Capacità del sollevatore posteriore [kg]	3785
<b>Peso</b>	
Peso totale consentito [kg]	13000
Peso max. consentito sull'assale anteriore [kg]	6000
Peso max. consentito sull'assale posteriore [kg]	9500
<b>Dimensioni</b>	
Lunghezza totale [mm]	5017
Altezza totale [mm]	3090
Larghezza totale (ai parafanghi) [mm]	2682
Passo [mm]	2884
<b>Pneumatici standard</b>	
Anteriori	600/65 R28
Posteriori	710/70 R38

**Tabella 5.0.5** Caratteristiche tecniche del trattore PUMA della casa produttrice CASE



**Figura 5.0.4** Trattore CASE, modello PUMA 170

### 5.2.2.3.1 Aratura

Durante il primo anno deve essere svolta una aratura del terreno (lavorazione di 30-40 cm), come attrezzatura si ipotizza l'utilizzo di un aratro della marca *Maschio Gaspardo*, modello *Sisto*.



**Figura 5.0.5** Aratro reversibile portato modello *Sisto*, marca *Maschio Gaspardo*

Caratteristiche tecniche:

- aratro reversibile portato con sistema di sicurezza a bullone;
- testata oscillante e spostabile (serie) o fissa con attacco rapido (opzione gratuita);
- sistema di larghezza di lavoro variabile integrale "*Variable Working Width*" idraulico per la scelta di qualsiasi larghezza di lavoro tra 30 e 50 cm;
- memoria automatica (per versioni a 5 o più vomeri);
- distanza tra i vomeri: 85 cm - 95 cm - 105 cm (optional);
- altezza dal terreno: 72 cm - 78 cm - 90 cm;
- telaio: 100 x 150 x 8mm (Serie 120); 150 x 150 x 10 (Serie 150); 150 x 150 x 12 (Serie 180).

Per considerare questa lavorazione è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come "**Tillage, ploughing/CH S**" (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

Tale elaborazione come unità di misura indica gli ettari che necessitano di essere arati.

Viene tenuto conto del consumo di gasolio, del numero di macchine agricole e del capannone dove sono situate. Inoltre, vengono considerate le emissioni atmosferiche prodotte dai motori

diesel, le emissioni di metalli pesanti derivanti dall'usura dei pneumatici durante il processo di lavoro, il lavoro preliminare per fissare l'aratro, il trasferimento sul campo (distanza teorica di 1 km), il lavoro sul campo e infine il ritorno in azienda con il relativo sgancio dell'aratro. Questi dati si basano su misurazioni effettuate in Svizzera su modelli degli anni compresi tra il 1999 e il 2001.

Si deve puntualizzare che le lavorazioni agricole svolte in Svizzera sono molto simili a quelle italiane e che le emissioni considerate in questo record saranno maggiori rispetto a quelle reali, dato che i motori attualmente in commercio hanno prestazioni migliori.

#### 5.2.2.3.2 Erpicatura

L'erpice rotante, chiamato anche rototerra, è un attrezzo portato dalla trattrice ed è molto usato nell'agricoltura di tipo estensivo. Il lavoro che svolge è di affinamento del terreno prima della semina di una coltura erbacea o, nel nostro caso, del trapianto delle talee.

Questo attrezzo è simile alla fresa o zappatrice con una sola sostanziale differenza, la fresa ha un albero orizzontale sul quale sono collocate le zappette che compiono un movimento circolatorio in avanti, mentre l'erpice ha dei rotori sui quali sono collocati dei denti chiamati coltelli, tali coltelli compiono un movimento circolatorio su se stessi in senso orizzontale, ciò non crea la suola di lavorazione che invece crea la fresa per il suo avanzamento verticale.

Nella scheda agronomica per la coltivazione del pioppo a ceduzione biennale l'erpice viene utilizzata durante il primo anno (2 passaggi) e durante il 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12° anno per l'estirpazione dell'interfila.

Si ipotizza di usare l'erpice a dischi *Presto* della casa produttrice *Maschio Gaspardo*.



**Figura 5.0.6** Erpice a dischi a telaio fisso, modello *Presto*

Considerando la versione con larghezza di lavoro di 300 cm si hanno come caratteristiche:

- profondità di lavoro di 10 cm;
- numero di dischi rotanti 24;
- diametro dei dischi di 460 mm.

Per considerare questa lavorazione è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Tillage, harrowing, by rotary harrow/CH S**” (in particolare all’interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L’unità di misura è l’ettaro di terreno che necessita di essere erpicato e gli impatti considerati sono gli stessi dell’aratro visto in precedenza (con le stesse conseguenti puntualizzazioni).

Dovendo considerare l’intera vita utile della coltura, gli ettari da erpicare devono essere moltiplicati per i passaggi effettuati nell’arco dei 12 anni. Quindi:

$$\text{Ettari da erpicare} = \text{ettari} * N^{\circ} \text{ di lavorazioni}$$

$$\text{Ettari da erpicare} = \text{ettari} \cdot 8$$

### 5.2.2.3.3 Concimazione di fondo

Durante il primo anno deve essere eseguita una concimazione di fondo del terreno con concime ternario 8-24-24 (la concimazione viene fornita in funzione della dotazione di base del suolo in potassio e fosforo), nel caso in analisi si considerano 600 [kg/ha].

Viene ipotizzato l’uso di uno spandiconcime centrifugo *Zeno 28* prodotto da *Maschio Gaspardo*.



**Figura 5.0.7** Spandiconcime centrifugo a doppio disco *Zeno 28*

Caratteristiche tecniche:

- attacco a 3 punti;
- presa di potenza 540 giri/min;
- massima larghezza di spandimento 28 metri;
- correzione automatica dell'angolo di uscita del concime sul disco;
- alimentazione con "Vibrofeed";
- protezione elastica della trasmissione;
- organi di alimentazione e spandimento in inox;
- apertura a comando idraulico indipendente dx/sx;
- tramoggia ribaltabile;
- griglia inferiore in acciaio inox;
- 2 finestre d'ispezione.

Per considerare questa lavorazione è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Fertilising, by broadcaster concime 8-24-24/CH S**” (in particolare all’interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L’unità di misura è l’ettaro, quindi vengono inseriti gli ettari totali della coltura. Gli impatti considerati sono gli stessi dell’aratro, bisogna comunque sottolineare che non viene considerato in questo processo il concime.

#### 5.2.2.3.4 Concime ternario 8-24-24

I concimi minerali si distinguono in semplici e complessi. I primi contengono un solo elemento principale della fertilità (N, P o K), i secondi ne contengono due (concimi binari) o tre (concimi ternari).

Nella formulazione si tiene conto anche del rapporto ponderale fra le diverse unità fertilizzanti in quanto deve essere il più possibile vicina alla formula di concimazione.

Il concime ternario 8-24-24 (8% in N, 24% in P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 24% in K<sub>2</sub>O, 44% H<sub>2</sub>O) è preferito per concimazioni precoci da integrare con successive concimazioni azotate in copertura perché permette di somministrare tutto il fosforo e il potassio all'inizio del ciclo colturale e contenere contemporaneamente le perdite di azoto frazionando la dose in più interventi.

Come detto precedentemente, nella concimazione di fondo, sono necessari 600 kg/ha di concime ternario.

Per considerare il concime nell'analisi LCA sono stati immessi i kg totali di N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O nelle caselle di input noti da tecnosfera (materiali/combustibili).

I record utilizzati per identificare l'azoto, il potassio e il fosforo (all'interno di: Processi – Materiali – Chemicals – Fertiliser (inorganic)) sono rispettivamente:

- “**Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER S**”;
- “**Potassium chloride, as K<sub>2</sub>O, at regional storehouse/RER S**”;
- “**Diammonium phosphate, as P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, at regional storehouse/RER S**”.

I processi che vengono inclusi in questi record sono la produzione dei concimi nell'impianto di fertilizzanti, il trasporto dei prodotti necessari alla loro formazione e il trasporto dei prodotti finiti dalla fabbrica al magazzino regionale. I dati sono basati su una media di vari impianti produttori di fertilizzanti presenti in Europa.

Per calcolare i kg di azoto è stata usata questa formula:

$$kg N = 600 \frac{kg}{ha} \cdot ettari \cdot \frac{8}{100}$$

Invece per i kg di potassio e fosforo:

$$kg K_2O = kg P_2O_5 = 600 \frac{kg}{ha} \cdot ettari \cdot \frac{24}{100}$$

#### 5.2.2.3.5 Trapianto

Attrezzatura semiautomatica ad elementi iniettori a pinze per il trapianto di talee di pioppo o talee simili. Modello progettato e realizzato appositamente per gli impianti di colture forestali a rapida rotazione (Short rotation forestry).

Il trapianto viene eseguito da elementi iniettori a pinze (8 nella versione standard) disposti radialmente ed equidistanti tra loro su una grande ruota di metallo che si muove per effetto del trascinamento causato dal movimento dal trattore.

Con la rotazione della ruota, quando un elemento iniettore si viene a trovare in posizione verticale, perpendicolare al terreno, un apposito interruttore di prossimità, tramite una elettrovalvola, comanda l'estensione di un martinetto idraulico che, a sua volta, spingendo l'elemento iniettore verso il basso, inserisce la talea nel terreno.

Innovativo nel suo genere, questo sistema consente di eseguire il trapianto senza la precedente apertura del solco.

Il modello che viene ipotizzato nell'analisi è la *trapiantatalee TP* della ditta *Spapperi*.



**Figura 5.0.8** *Trapiantatalee TP*, casa produttrice *Spapperi*

Caratteristiche tecniche:

- il modello TP realizza sia impianti a file binate regolabili (interbina - IB) da 75 cm, che impianti a file singole regolabili (interfila - IF) fino a 300 cm.
- interpianta (IP) regolabile in funzione degli elementi iniettori (massimo 16 elementi iniettori). La versione standard con 8 elementi equivale a 50 cm.
- produzione oraria indicativa: circa 1750/ 1800 talee/ora per operatore (considerando due operatori il tempo stimato è di 0,54 h/ha);
- la talea deve essere lunga 300 mm e avere un diametro compreso tra 5 – 25 mm.

Per considerare questa lavorazione è stato modificato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Tractor I**” (in particolare all'interno di: Processi – Trasporto – Road). L'unità di misura è il km e sono calcolate le emissioni dovute alla combustione del carburante.

Sapendo che con la trapiantatrice trainata da un trattore da 51 kW (nel nostro caso consideriamo il SAME FARMALL 65 A) si ha un consumo di 20,3 kg/ha; possiamo calcolare quanti kg di Diesel vengono consumati per km:

$$\frac{100 \text{ m}}{3 \text{ m}} \cong 33 \text{ file per ettaro}$$

La trapiantatrice pianta contemporaneamente due file, alla distanza di 3 metri una dall'altra, ad ogni suo passaggio. Quindi:

$$\frac{33 \text{ file}}{2} \cdot 100 \text{ m} = 1650 \text{ m/ha} = 1,65 \text{ km/ha}$$

Essendo 1,65 km la distanza che il trattore percorre per ogni ettaro che viene piantato, il consumo di Diesel per km è:

$$\frac{20,3 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{1,65 \frac{\text{km}}{\text{ha}}} = 12,3 \frac{\text{kg}}{\text{km}}$$

Prendendo in considerazione questo dato è stato modificato il record “**Tractor I**” in “**tractor I (modificato per trapiantatrice)**”, dove sono stati scalati i consumi e le emissioni in maniera coerente con i dati appena calcolati.

Ora si calcolano i km totali che percorre la trapiantatrice nei 12 anni:

$$1,65 \frac{\text{km}}{\text{ha}} \cdot \text{ettari} = \text{km totali percorsi dalla trapiantatrice}$$

#### 5.2.2.3.6 Diserbo antigerminello

Gli erbicidi possono essere classificati secondo la chimica dei principi attivi (esistono numerose famiglie chimiche di erbicidi) oppure a seconda delle specie vegetali obiettivo. In particolare per le malerbe si usa distinguere il gruppo botanico delle dicotiledoni da quello delle monocotiledoni, denominate rispettivamente specie a foglia larga e a foglia stretta, per le quali esistono erbicidi in grado di colpire le une risparmiando le altre. Alcuni principi attivi colpiscono indistintamente mono e dicotiledoni, come ad esempio il *Glyphosate*.

Altra classificazione divide gli erbicidi in composti antigerminello, che impediscono la germinazione delle malerbe; questi vengono anche definiti di pre-emergenza, poiché

colpiscono l'infestante allo stadio di plantula annullandone di fatto lo sviluppo prima che possa competere con la specie coltivata.

Nel caso in esame il diserbo antigerminello è composto da:

- Pendimethalin => 1,3 kg/ha;
- Linuron => 0,4 kg/ha;
- Alachlor => 1,4 kg/ha.

Per considerare il trattamento in pre-emergenza nell'analisi LCA sono stati immessi i kg totali delle sostanze che compongono l'antigerminello nelle caselle di input noti da tecnosfera (materiali/combustibili).

I record utilizzati per identificarli (all'interno di: Processi – Materiali – Chemicals – Pesticides) sono rispettivamente:

- **“Pendimethalin, at regional storage/RER S”;**
- **“Linuron, at regional storehouse/RER S”;**
- **“Alachlor, at regional storehouse/RER S”.**

Sono considerati i materiali, il consumo di energia, le infrastrutture e le emissioni; i dati sono basati su una media di vari impianti produttori di diserbanti chimici.

Tale trattamento viene effettuato durante il primo anno di vita della coltura, si ipotizza l'utilizzo della macchina agricola *Saturno* della casa produttrice Maschio *Gaspardo*.



**Figura 5.0.9** Irroratrice *Saturno* marca *Maschio Gaspardo*

Caratteristiche tecniche della versione 800 (ipotizzata nell'analisi):

- capacità del serbatoio di 850 litri;
- larghezza barra da 14 a 18 metri;

- pompa da 20 bar con portata di 250 l/min;
- sollevamento barra di 1 metro.

Per considerare l'irroratrice è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Application of plant protection products, by field sprayer/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L'unità di misura è l'ettaro e gli impatti conteggiati sono gli stessi dell'aratro, dato che la banca dati di appartenenza è quello delle lavorazioni agricole svolte in Svizzera.

### 5.2.2.3.7 Sarchiatura

La sarchiatura è una lavorazione superficiale del terreno per 3-4 cm di profondità, per attivare la respirazione delle radici, attenuare l'evaporazione per capillarità, distruggere le malerbe. La macchina agricola usata allo scopo, la sarchiatrice, presenta un organo di lavoro consistente in un telaio che porta un albero orizzontale, munito di numerose zappette, posto in rotazione dal motore del trattore che trascina l'attrezzo.

La macchina ipotizzata per svolgere questo lavoro è la *HS* della marca *Maschio Gaspardo*, il terreno viene erpicato una sola volta durante il primo anno della coltura.



**Figura 5.0.10** Sarchiatrice *HS*

Caratteristiche tecniche:

- larghezza di lavoro di 2,5 metri;
- attacco a 3 punti con 1° e 2° punto fissi;

- ruote per la regolazione profondità di lavoro dell'elemento in ferro con cuscinetti a sfere.

Per considerare l'irroratrice è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Tillage, harrowing, by spring tine harrow/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L'unità di misura è l'ettaro e le considerazioni sugli impatti sono le stesse fatte sull'aratro (banca dati Svizzera).

#### 5.2.2.3.8 Concimazione di copertura

Per questa lavorazione viene ipotizzato l'uso dello spandiconcime centrifugo *Zeno 28* (lo stesso usato per il concime ternario) e il concime considerato è l'urea 46% (46% di N).



**Figura 5.0.11** Urea 46%

L'urea è un composto azotato con formula chimica  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (il diammide dell'acido carbonico).

Si ricava da moltissimi prodotti di scarto, tra cui le urine, ma anche attraverso reazioni chimiche, si tratta quindi di un prodotto a metà tra l'organico e il biologico. La sostanza, a pH neutro, si presenta come un sale cristallino di colore bianco.

L'urea non modifica le proprietà chimico fisiche del terreno, ma arricchisce quest'ultimo di azoto. Il composto, solubile in acqua, è di facile assorbimento, perché entro pochi giorni si trasforma in azoto ammonico e poi in azoto nitrico. La sua elevata solubilità in acqua lo rende immediatamente assorbibile dal terreno e dalle piante, evitando il rischio di dispersione a causa del dilavamento.

La concimazione di copertura deve essere eseguita il primo anno con 150 kg/ha di urea 46% e nel 3°, 5°, 7°, 9°, 11° anno con 200 kg/ha.

Risulta semplice calcolare l'urea necessaria per i 12 anni della coltivazione:

$$150 \frac{\text{kg}}{\text{ettaro}} \cdot \text{ettari} + 200 \frac{\text{kg}}{\text{ettaro}} \cdot \text{ettari} \cdot 5 = \text{kg totali di urea 46\%}$$

Per considerare la concimazione di copertura nell'analisi LCA sono stati immessi i kg totali di urea nella casella di input noti da tecnosfera (materiali/combustibili).

Il record utilizzato per identificarla (all'interno di: Processi – Materiali – Chemicals – Fertiliser (inorganic)) è “**Urea, as N, at regional storehouse/RER S**”.

Questo processo valuta la produzione di urea da ammoniaca e anidride carbonica. I trasporti dei prodotti intermedi sono inclusi come pure l'infrastruttura e il trasporto del prodotto finale dalla fabbrica al magazzino regionale. Il consumo di CO<sub>2</sub> (733 kg CO<sub>2</sub>/ton di urea) durante la produzione dell'urea non è calcolato, poiché la CO<sub>2</sub> sorge come sottoprodotto durante la produzione dell'ammoniaca. I dati sono basati su una media di vari impianti produttori di fertilizzanti.

Il record relativo allo spandiconcime rotativo è “**Fertilising, by broadcaster/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural). Essendo l'unità di misura l'ettaro si devono calcolare gli ettari totali da concimare nei 12 anni della coltura:

$$\text{Ettari da concimare} = \text{ettari} \cdot 6 \text{ lavorazioni}$$

#### 5.2.2.3.9 Diserbo chimico localizzato

Tale lavorazione viene eseguita durante il primo anno e nel 3°, 5°, 7°, 9°, 11° anno, il diserbo considerato è il *glufosinate ammonio* in misura di 0,45 kg/ha.

La macchina ipotizzata per svolgere questo compito è l'atomizzatore trainato *Apollo* della casa produttrice *Maschio Gaspardo*.



Figura 5.0.12 Atomizzatore trainato *Apollo*

Caratteristiche tecniche:

- telaio in acciaio verniciato a polveri epossidiche;
- piedino di sostegno con ruota;
- convogliatore in acciaio;
- carreggiata ruota a larghezza variabile;
- filtro a cestello con pre-mixer;
- cisterna in polietilene a svuotamento totale;
- cisterna lava-circuito;
- indicatore di livello esterno;
- getti doppi antigoccia in ottone;
- agitatore idraulico;
- filtro autopulente sulla mandata;

Per considerare l'atomizzatore è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Application of plant protection products, by field sprayer/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural). Tale record è lo stesso dell'irroratrice dato che i consumi e gli impatti possono essere approssimativamente considerati uguali.

$$\text{Ettari diserbo localizzato} = \text{ettari} \cdot 6 \text{ lavorazioni}$$

Il *glufosinate ammonio* non essendo presente nelle banche dati a mia disposizione non è stato considerato quale input a tecnosfera (materiali/combustibili), nonostante questo è stato considerato in emissioni nel terreno:

$$kg \text{ totali glufosinate ammonio} = 0,45 \frac{kg}{ha} \cdot \text{ettari} \cdot 6 \text{ lavorazioni}$$

#### 5.2.2.3.10 Pulizia dell'interfila

La pulizia dell'interfila viene eseguita:

- 2 volte durante il 1°, 3°, 5°, 7°, 9°, 11° anno;
- 1 volta durante il 2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12° anno.

La macchina ipotizzata è la fresatrice modello *B* della casa produttrice *Maschio Gaspardo*.



**Figura 5.0.13** Fresatrice modello *B*, *Maschio Gaspardo*

Caratteristiche tecniche della versione 180:

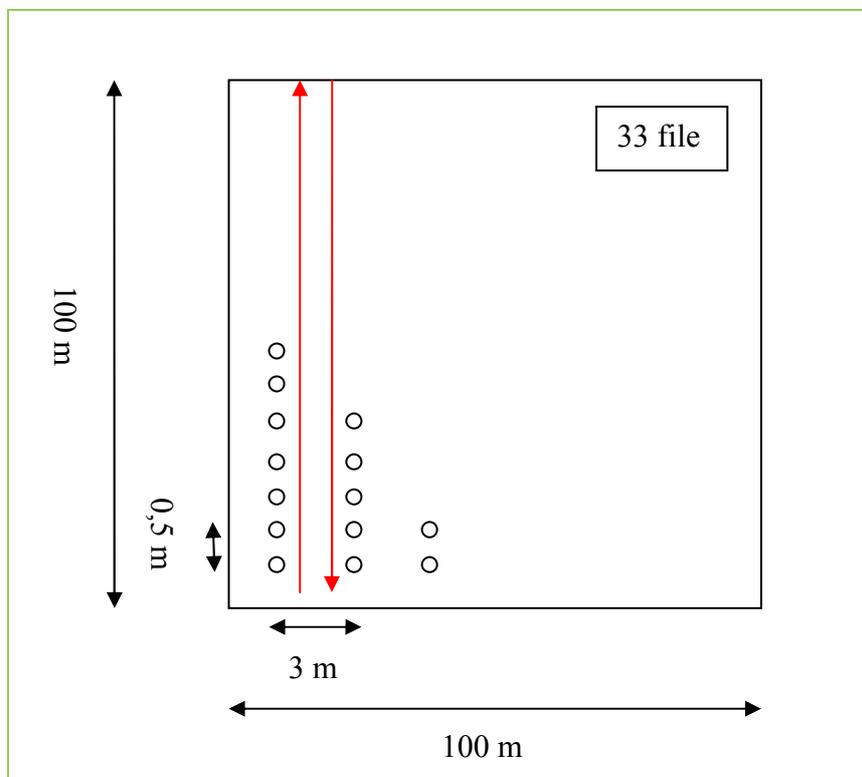
- larghezza di lavoro di 185 cm;
- ingombro laterale di 195 cm;
- profondità di lavoro 27 cm;
- numero di utensili 42.

Per considerare l'irroratrice è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Tillage, rotary cultivator/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L'unità di misura è l'ettaro e le considerazioni sugli impatti sono le stesse fatte sull'aratro (banca dati Svizzera). Dovendo considerare l'intera vita utile della coltura, gli ettari da fresare devono essere moltiplicati per i passaggi effettuati nell'arco dei 12 anni. Quindi:

$$\text{Ettari da fresare} = \text{ettari} * N^{\circ} \text{ di lavorazioni}$$

$$\text{Ettari da fresare} = \text{ettari} \cdot 18$$



**Figura 5.0.14** Passaggi della fresatrice tra le file

#### 5.2.2.3.11 *Trattamento insetticida*

Nella analisi LCA verrà trascurata questa lavorazione poiché viene effettuata solo in casi strettamente necessari.

### 5.2.2.3.12 Intervento irriguo di soccorso

L'intervento irriguo viene eseguito solo il primo anno, subito dopo il trapianto delle talee, ed è facoltativo. Per questo nell'analisi LCA vengono considerati due scenari, uno relativo alla coltivazione con irrigazione e uno senza irrigazione. La differenza che intercorre tra le due scelte progettuali, oltre che al costo delle pompe e il consumo di acqua, è la resa del pioppo (i dati sono relativi alla media nazionale):

- con l'ausilio dell'irrigazione si ha una resa di 17,5 t<sub>ss</sub>/ha;
- senza irrigazione la resa è di 15 t<sub>ss</sub>/ha.

Se viene scelta l'irrigazione sono necessari 1200 m<sup>3</sup> di acqua ettaro (irrigazione effettuata solo il primo anno). Questo comporta a:

$$1200 \frac{m^3}{ha} \cdot ettari = m^3 \text{ totali necessari}$$

Per considerare l'irrigazione è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Irrigating/m3/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L'unità di misura è il m<sup>3</sup>, viene tenuto conto dell'energia elettrica e della quantità di gasolio consumati, del numero di macchine agricole e del capannone. Si considerano anche le infrastrutture e i processi correlati all'irrigazione, come la pompa (22 kW, portata 30 m<sup>3</sup>/h, ΔP di 7-8 bar), i tubi (diametro 75 mm), ecc.

Inoltre, vengono calcolate le emissioni atmosferiche prodotte dai motori diesel, le emissioni dei metalli pesanti derivanti dall'usura dei pneumatici durante il processo di lavoro, il lavoro preliminare per fissare le attrezzature, il trasferimento sul campo (distanza teorica di 1 km), il lavoro sul campo e infine il ritorno in azienda con il relativo sgancio delle apparecchiature. L'intero ammontare di acqua utilizzata è già considerata negli input noti a tecnosfera con il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**water, fresh**”. Questi dati si basano su misurazioni effettuate in Svizzera su modelli degli anni compresi tra il 1999 e il 2001. Le puntualizzazioni che si possono fare sono le stesse fatte per l'aratro.

### 5.2.2.3.13 Raccolta

Nelle condizioni ideali le piante di pioppo si sviluppano molto rapidamente, raggiungendo altezze fino a 8 metri al secondo anno e diametro del fusto di 6-7 cm. La raccolta si effettua durante il riposo vegetativo della coltura (da dicembre fino a marzo-aprile) e richiede una meccanizzazione dedicata. La ricerca agricola ha messo a punto negli anni recenti varie tipologie di macchine per la raccolta, sia semoventi che trainate, che hanno raggiunto ormai livelli di efficienza e affidabilità elevati. I fattori che condizionano la scelta della tecnologia sono principalmente due: in primo luogo la durata del turno, in quanto ad essa sono legate la dimensione delle piante ed il sesto di impianto, ed in secondo luogo l'estensione delle superfici da raccogliere. Le varie soluzioni sviluppate dai produttori di macchine agricole sono classificabili in due ampie categorie: le macchine semoventi e quelle portate (che ricevono la potenza motrice da una trattoria agricola).

È evidente che le macchine semoventi, in grado di esprimere una capacità di lavoro nettamente superiore alle macchine portate, hanno anche un costo sensibilmente maggiore, pertanto devono essere impiegate per un numero di ore relativamente più elevato rispetto alle seconde, richiedendo dunque superfici di raccolta proporzionalmente maggiori, per mantenere basso il costo orario.

Ad oggi il sistema più efficace per raccogliere il ceduo a turno annuale è costituito da un cantiere basato su una falcia-trincia-caricatrice Claas, identica a quelle per la raccolta del mais da insilato, dotata di una testata modificata per il taglio dei fusti. Nelle condizioni ideali questo tipo di cantiere consente di raccogliere da 28 a 35 tonnellate di biomassa fresca per ora netta di lavoro. L'alta produttività è il vantaggio principale di questo sistema, tuttavia la versione messa a punto per il taglio annuale è concepita per tagliare fusti molto numerosi ma di piccolo diametro (massimo 6 cm), mentre difficilmente si adatta alla raccolta del pioppo biennale, dove aumentano i bloccaggi e le rotture.

Per superare questo ostacolo è stata sviluppata in Italia negli ultimi anni una testata modificata (testata GBE) in grado di tagliare agevolmente sia il ceduo a turno biennale che triennale. Il costo delle falcia-trincia-caricatrici Claas è piuttosto elevato, come pure quello della testata GBE; pertanto l'acquisto di queste macchine sarebbe giustificato soltanto in presenza di comprensori di SRF di ampie dimensioni, così da distribuire i costi fissi su un numero maggiore di ore di lavoro annuali. Tuttavia è da considerare che la stessa macchina può essere impiegata in estate per la raccolta del mais da insilato ed in inverno (sostituendo la testata da

mais con quella modificata) per la raccolta del pioppo. In questo modo è possibile aumentare il numero di ore di lavoro e ridurre i costi operativi.



**Figura 5.0.15** Falcia-tricia-caricatrice Claas con testata modificata GBE

Un'alternativa al cantiere Claas è costituita dalle trincia-caricatrici Spapperi. La differenza principale è che mentre il primo cantiere richiede l'uso di una macchina semovente Claas, in questo caso la macchina può essere montata su un trattore comune da circa 150 kW, preferibilmente a guida retroversa.



**Figura 5.0.16** Falcia-tricia-caricatrice Spapperi

Questa macchina deriva dalla modifica di una collaudata cippatrice a disco di origine finlandese, ottenuta montando due seghe circolari di fronte alla bocca di alimentazione. Le seghe circolari ruotano sullo stesso asse di due rulli dentati, che servono a convogliare i fusti tagliati nella scippatrice.

Si tratta dunque di una soluzione che presenta un costo di investimento nettamente inferiore alla prima, adatta per la raccolta su superfici ridotte (indicativamente entro gli 80-100 ettari); tuttavia presenta una produttività oraria inferiore alla Claas (circa 17 t/h), e pertanto un costo di raccolta maggiore per l'intero cantiere.

Entrambe queste macchine producono un cippato di buona qualità, tuttavia è ben noto che, avendo alla raccolta una umidità compresa tra il 55-60%, il cippato fresco tende a fermentare durante lo stoccaggio, specie se tenuto all'aperto senza coperture. Le perdite di sostanza secca per fermentazione possono essere considerevoli (dell'ordine del 5% al mese).

Un'ulteriore soluzione impiegabile per la raccolta del turno biennale è quella basata su un cantiere a due fasi, il quale prevede l'abbattimento e la cippatura in due fasi distinte.

I sistemi di lavoro che adottano questa tecnica sono attualmente due:

- abbattimento e accatastamento a bordo campo, per una successiva cippatura ad opera di cippatrice fissa dotata di braccio idraulico con pinza.
- abbattimento e andana tura tra le file, per una successiva cippatura ad opera di una scippatrice dotata di *pick up* rotativo.

Quest'ultimo prevede l'utilizzo invernale della sola abbattitrice, posticipando l'ingresso della cippatrice con *pick up* e dei trattori con i rimorchi tra la fine di aprile e la fine di maggio, periodo questo che garantisce, in linea di massima, condizioni ambientali tali da ritenere che il passaggio del cantiere non influisca negativamente sul compattamento del suolo. Il prodotto andanato, inoltre, durante lo stoccaggio in campo subisce la riduzione del contenuto idrico passando dal 55-60% a circa il 30%, ottenendo così un prodotto con caratteristiche migliori per la successiva trasformazione o per lo stoccaggio. È da sottolineare, infine, che il basso tenore di umidità delle piante influenza le proprietà fisiche e la resistenza meccanica durante la cippatura.



**Figura 5.0.17** Macchina andanatrice

È stato sviluppato un *pick up* da montare sulla falcia-trincia-caricatrice commerciale Spapperi, in modo che la stessa, cambiando l'organo frontale, possa operare sia su piante in piedi che andanate. La macchina è in grado di avanzare lungo le interfile cippando le piante precedentemente abbattute e deposte in andana, scaricando il prodotto su rimorchio trainato da trattore.

Il dispositivo raccoglie le piante da terra sollevandone i calci, mentre il moto di avanzamento della trattrice e il dispositivo di convogliamento favoriscono l'ingresso delle stesse verso i rulli di alimentazione del dispositivo cippatore. Il prodotto viene quindi cippato e scaricato sui rimorchi.



**Figura 5.0.18** Testata *pick up* Spapperi

Le prove di raccolta eseguite hanno permesso di valutare positivamente sia le scelte tecniche effettuate che la funzionalità della raccogliitrice nel complesso. Le innovazioni apportate alla macchina per consentirne l'impiego anche in questa nuova tipologia di cantieri dovevano

garantire la perfetta raccolta delle piante precedentemente abbattute e l'ottimale convogliamento delle stesse nella camera di alimentazione del cippatore. Uno studio comparativo condotto sulla pezzatura del cippato ottenuto dalla falcia-trincia-caricatrice con testata tradizionale, in raccolta di piante in piedi, e la medesima macchina equipaggiata con testata pick up, in raccolta di piante andanate, ha evidenziato, per quest'ultima tipologia di cantiere, una minore presenza di prodotto fine (< 3,15 mm) e di impurità. Ciò, probabilmente, è dovuto al fatto che nel cantiere di raccolta ad una fase, tutto ciò che si trova al di sopra delle lame di taglio entra a far parte del prodotto raccolto, comprese foglie secche e terreno, mentre il *pick up* è conformato in maniera tale da rilasciare a terra le impurità eventualmente presenti nel prodotto prima della cippatura.

Nell'analisi LCA la macchina ipotizzata è la Claas Jaguar 880 con testata modificata GBE. Le sue caratteristiche tecniche sono:

- tipologia: semovente;
- potenza di 340 kW;
- caduta parallela della pianta rispetto alla direzione di avanzamento;
- il diametro massimo delle piante è 80 mm;
- organo di taglio: seghe a disco in posizione frontale;
- organo di cippatura: coltelli a tamburo
- produttività: 15,6 t<sub>ss</sub>/h.

Dato che la macchina ipotizzata è identica a quelle per la raccolta del mais da insilato, con la sola aggiunta di una testata modificata, nella LCA viene considerata una mietitrebbia tipica delle colture di mais. L'errore che si commette nei calcoli è trascurabile, quindi per la falcia-trincia-caricatrice è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Combine harvesting/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Elaborazioni – Agricultural).

L'unità di misura è l'ettaro e le considerazioni sugli impatti sono le stesse fatte sull'aratro (banca dati Svizzera). Dovendo considerare l'intera vita utile della coltura:

$$\text{Ettari da raccogliere} = \text{ettari} \cdot N^{\circ} \text{ di ceduzioni}$$

$$\text{Ettari da raccogliere} = \text{ettari} \cdot 6$$

#### 5.2.2.3.14 Trasporto del cippato fresco all'imposto

Durante la fase di cippatura la falcia-trincia-caricatrice Claas è affiancata da un trattore con rimorchio, il quale raccoglie il cippato prodotto e lo trasporta all'imposto.

Per considerare il trattore con rimorchio è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Transport, tractor and trailer/CH U**” (in particolare all'interno di: Processi – Trasporto – Road). L'unità di misura è la tkm (tonnellate totali moltiplicate per i km percorsi a pieno carico):

$$\begin{aligned} tkm \text{ totali} = & \text{ tonnellate prodotte 12 anni} \cdot \text{Distanza bosco imposto} \cdot 1,7 + \\ & + 3,3 \cdot \text{ettari} \cdot 1,7 \cdot \text{tonnellate prodotte 12 anni} \end{aligned}$$

A livello sperimentale è accettato l'utilizzo nel *software* di un fattore moltiplicativo che tiene già conto dei km totali effettuati sia a pieno carico che a vuoto; tale fattore è convenzionalmente fissato in 1,7, da moltiplicare per i km percorsi a pieno carico.

La prima parte dell'espressione calcola le tkm riferite alla distanza tra bosco e imposto, la seconda parte, invece, le tkm effettuate della trattore con rimorchio durante l'affiancamento della falcia-trincia-caricatrice. Dato che il percorso di ritorno è più breve rispetto a quello di affiancamento e che l'andata è a carico variabile da vuoto a pieno, non si moltiplica per il fattore 1,7 e i km percorsi per ettaro vengono considerati a metà:

$$\begin{aligned} tkm \text{ totali} = & \text{ tonnellate prodotte 12 anni} \cdot \text{Distanza bosco imposto} \cdot 1,7 + \\ & + 1,65 \cdot \text{ettari} \cdot \text{tonnellate prodotte 12 anni} \end{aligned}$$

La capacità di carico è di 8 t, la velocità media a pieno carico è di 15 km/h, la velocità media a vuoto è di 25 km/h. Le considerazioni sugli impatti sono le stesse fatte sull'aratro (banca dati Svizzera).

#### 5.2.2.3.15 Ripristino del terreno

Alla fine del turno, dopo l'abbattimento della piantagione, parte della biomassa legnosa prodotta (cimali, ceppaie e residui radicali) resta nel terreno. I cimali e le ramaglie possono

essere eliminati con la bruciatura (non sempre ammessa) oppure con la triturazione (trituratore forestale in figura 5.0.19)



**Figura 5.0.19** Trituratore forestale

Per considerare questo attrezzo è stato modificato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Tractor I**” (in particolare all’interno di: Processi – Trasporto – Road). L’unità di misura è il km e valuta le emissioni dovute alla combustione del carburante. Sapendo che il trituratore forestale, se trainato da un trattore da 80 kW (nel nostro caso ipotizziamo il SAME FARMALL 115 A), consuma 240,4 kg/ha; possiamo calcolare quanti kg di Diesel vengono consumati per km:  
Avendo larghezza di lavoro di 2,5 metri:.

$$\frac{100 \text{ m}}{2,5 \text{ m}} \cdot 100 \text{ m} = 4 \frac{\text{km}}{\text{ha}}$$

Essendo 4 km la distanza che il trattore percorre per ogni ettaro che viene ripristinato, il consumo di Diesel per km è:

$$\frac{240,4 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{4 \frac{\text{km}}{\text{ha}}} = 60,1 \frac{\text{kg}}{\text{km}}$$

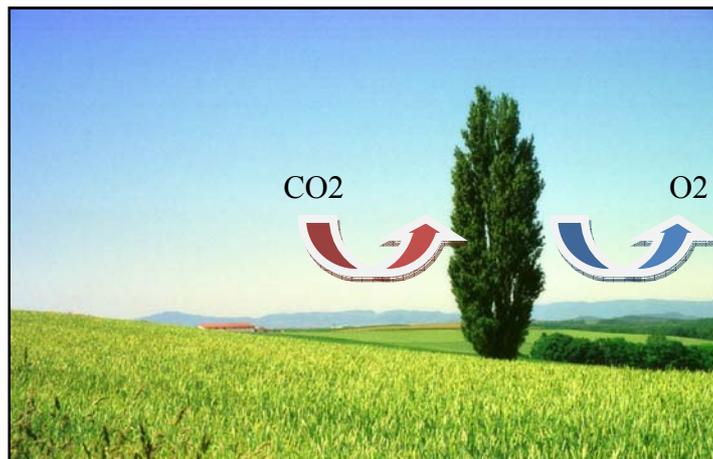
Prendendo in considerazione questo dato è stato modificato il record “**Tractor I**” in “**Tractor I (modificato per Tree levelling finale)**”, dove sono stati scalati i consumi e le emissioni in maniera coerente con i dati appena calcolati.

Ora si calcolano i km totali che percorre il tritratore forestale:

$$4 \frac{km}{ha} \cdot ettari = km \text{ totali percorsi dal tritratore}$$

#### 5.2.2.3.16 CO<sub>2</sub> immagazzinata

Come espresso nel capitolo 2.2, durante la crescita gli alberi di pioppo immagazzinano anidride carbonica.



**Figura 5.0.20** Assorbimento di CO<sub>2</sub> nella crescita dell'albero

Nell'analisi LCA il processo di assorbimento di CO<sub>2</sub> è considerato tramite una routine creata appositamente: “**CO<sub>2</sub> immagazzinata nella crescita**”.

Il processo si basa sul concetto che per ogni kg<sub>ss</sub> sono assorbiti dalla pianta 1,7823 kg di anidride carbonica, quindi:

$$CO_2 \text{ immagazzinata} = kg_{ss} \cdot 1,7823$$

Tale routine è inserita nel processo della coltivazione del pioppo come prodotto evitato, così da avere un saldo negativo nei calcoli.

### 5.2.3 Logistica e stoccaggio

In questa macrofase vengono analizzati:

- il trasporto del cippato all'impianto di gassificazione;
- lo stoccaggio con relativa essiccazione.

#### 5.2.3.1 La logistica

La gestione della logistica è un aspetto importante per assicurare l'approvvigionamento della biomassa con le caratteristiche fisiche ed energetiche desiderate dall'impianto produttivo (pezzatura, omogeneità, contenuto idrico, contenuto di ceneri, etc.) e può incidere notevolmente sia sui costi di trasporto che sul bilancio energetico della filiera, in quanto il trasporto richiede l'impiego di carburanti tradizionali, che contribuiscono negativamente al bilancio. Ogni fase della filiera, dalla raccolta, movimentazione, trasporto, stoccaggio fino al conferimento all'industria, deve essere necessariamente ottimizzata tenendo conto dei mezzi produttivi presenti, della rete viaria poderale e interpoderale, della localizzazione dell'industria di trasformazione finale, dei siti di stoccaggio intermedi. Tutto per garantire il minore costo di conferimento per unità di prodotto ed il minore impatto ambientale sul territorio.

Sia che si impieghino cantieri di raccolta a una o a due fasi (taglio e successiva raccolta), la biomassa viene trasportata fuori dall'appezzamento sottoforma di cippato.

In linea generale, se la distanza dell'appezzamento dalla centrale è ridotta (indicativamente entro un raggio di 10 km), la soluzione più pratica ed economicamente vantaggiosa è il trasporto diretto con lo stesso rimorchio agricolo. Nel caso di distanze superiori invece è opportuno valutare la possibilità di impiegare automezzi più rapidi e con una capacità di carico maggiore, come autocarri e autoarticolati; tuttavia poiché questi mezzi non possono accedere direttamente agli appezzamenti come i rimorchi agricoli, questa soluzione comporta un dispendio notevole di tempo per le necessarie operazioni di carico e scarico.

Nella analisi LCA sono analizzate tre situazioni logistiche differenti:

- Caso A: distanza tra l'imposto e l'impianto produttivo (impianto di gassificazione) di 10 km;
- Caso B: distanza tra l'imposto e l'impianto produttivo di 50 km;

- Caso C: distanza tra l'imposto e l'impianto produttivo di 100 km.

Nel caso A il mezzo ipotizzato per il trasporto è la stessa trattoria con rimorchio utilizzata nella fase di raccolta del pioppo tramite falcia-trincia-caricatrice Claas, quindi è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Transport, tractor and trailer/CH S**” (in particolare all'interno di: Processi – Trasporto – Road).

$$tkm\ totali = tonnellate\ prodotte\ 12\ anni \cdot 10\ km$$

Nel caso B e nel caso C si ipotizza l'uso di autocarri o autoarticolati. è stato utilizzato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER S**” (in particolare all'interno di: Processi – Trasporto – Road).

$$tkm\ totali = tonnellate\ prodotte\ 12\ anni \cdot distanza\ ipotizzata\ [km]$$

Viene tenuto conto della produzione, manutenzione e smaltimento dei veicoli utilizzati, inoltre, viene considerata la costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali. L'impatto ambientale degli interventi atti alla costruzione, rinnovamento e fine vita delle infrastrutture è stato assegnato in base alle *performance* relative alle tonnellate-chilometro lorde. I dati relativi alle infrastrutture stradali, al funzionamento del veicolo e allo smaltimento dello stesso a fine vita riflettono la situazione Svizzera, mentre i dati relativi alla produzione e manutenzione del veicolo sono ricavati dalla media europea. L'errore che si commette considerando la situazione media Svizzera è trascurabile.

### 5.2.3.2 Lo stoccaggio

La raccolta del pioppo allevato a *Short rotation forestry* avviene nel periodo di riposo vegetativo, da dicembre a marzo. Si rende quindi necessario un periodo di stoccaggio sia per far fronte alle esigenze di approvvigionamento, sia per ovviare alla difficoltà di usare il materiale appena raccolto che, con un tenore di umidità del 55-60%, rende la combustione difficoltosa in quanto l'evaporazione dell'acqua sottrae calore utile al processo di combustione.

Lo stoccaggio è, quindi, una fase della filiera legno-energia che riveste particolare importanza nella valorizzazione del prodotto, ma può comportare fenomeni microbiologici che si traducono in una perdita di sostanza secca. Tali fenomeni dipendono da diversi fattori:

- microclima;
- modalità di stoccaggio;
- pezzatura.

#### 5.2.3.2.1 Fenomeni degradativi

All'interno di un cumulo di cippato risulta possibile individuare i seguenti fenomeni legati alla degradazione: da 10-15 °C fino a 60-65 °C hanno luogo le reazioni biochimiche; sopra i 60-65 °C hanno luogo le reazioni puramente chimiche (ossidative).

Entrambe le reazioni provocano la decomposizione della materia organica con conseguente perdita di sostanza secca. Il processo può essere rallentato, limitato, ma non evitato se non con un elevato dispendio di risorse, in particolare energetiche.

Il processo di degradazione è influenzato dal tenore di ossigeno e dall'acqua presente nella massa.

I funghi, che sembrano essere i principali agenti degenerativi, attaccano per via enzimatica la parete cellulare, invadendo i lumi cellulari attraverso pori esistenti o perforando i tessuti, degradando prima la cellulosa e l'emicellulosa, e solo successivamente la lignina.

#### 5.2.3.2.2 L'essiccazione naturale del cippato del pioppo

La riduzione della quantità di acqua contenuta nel legno è dovuta al lento equilibrarsi dell'umidità del legno con quella dell'aria che lo circonda. L'essiccazione naturale procede per stati sempre meno umidi fino al raggiungimento del più basso gradiente di umidità possibile in quelle condizioni di pressione e temperatura.

L'essiccazione procede quindi più velocemente quanto è più elevata la differenza di contenuto idrico tra legno e aria presente all'interno del materiale stoccato; quest'ultima è in relazione al suo ricambio (presenza di vento) e ai valori di umidità e temperatura dell'aria esterna al cumulo.

Inoltre è da tenere presente che:

- la perdita d'acqua non avviene in maniera uniforme e simultanea nel corpo legnoso, ma procede gradualmente dall'esterno verso l'interno;
- la cessione d'acqua procede molto più celermente nel senso delle fibre: l'allontanamento dell'acqua di imbibizione è più veloce dell'evacuazione dell'acqua di saturazione;
- i legni leggeri si essiccano più velocemente di quelli pesanti, anche se la porosità non è un indice di permeabilità;
- l'ombra, la scarsa ventilazione, il contatto con il suolo e le erbe spontanee non solo rallentano di molto l'essiccazione naturale, ma favoriscono lo sviluppo di infezioni batteriche e fungine che portano a perdita di sostanza legnosa;
- la corteccia rallenta lo scambio di acqua fra legno e aria.

Oltre al passaggio di acqua dal legno all'ambiente esterno va considerata, qualora il cumulo non sia al riparo dagli eventi meteorici, il passaggio inverso, ovvero la parziale entrata all'interno del legno di acqua meteorica (pioggia, neve, nebbia).

In questo caso è da tenere presente che:

- la presenza della corteccia è di fondamentale importanza per rallentare l'assorbimento dell'acqua da parte del legno; nel cippato, maggiore è la superficie non protetta dalla corteccia, ovvero la percentuale del durame esposto, maggiore è la potenzialità di riassorbimento dell'acqua meteorica;
- i legni leggeri e più porosi assorbono più facilmente l'acqua con cui vengono a contatto.

Il cippato, raccolto con macchine ormai diffusamente presenti sul mercato, viene accatastato in cumuli e stoccato per tempi più o meno lunghi, a seconda delle esigenze. Come detto precedentemente, durante lo stoccaggio le temperature interne e i gradienti di umidità del materiale portano alla progressiva e parziale disidratazione dello stesso.

Tuttavia tale sistema, proprio perché sfrutta il calore generato dai processi di respirazione che si instaurano ad opera di microrganismi, comporta sempre una perdita di sostanza secca. Quest'ultima dipende da molti fattori tra cui: il grado di compattamento e la pezzatura.

Vengono analizzati due stoccaggi di pioppo di diversa pezzatura (ricerche condotte dal Cra-Ing<sup>12</sup> nell'anno 2008):

---

<sup>12</sup> Unità di ricerca per l'ingegneria agraria (Roma)

- cumulo, a pezzatura più grossa, ottenuto con taglia cippatrice Spapperi in provincia di Cuneo;
- cumulo, a pezzatura più ridotta, ottenuto con Claas Jaguar 890 in provincia di Ferrara;

Va ricordato che la pezzatura finale dipende sia dalla macchina utilizzata per la raccolta che dall'età delle piante: un cippato da R2F2 (radice di due anni e fusto di due anni) avrà comunque dimensioni medie inferiori rispetto un cippato da coltura quadriennale.

### Materiali e metodi

Nella provincia di Cuneo è stato costituito un cumulo di cippato (lunghezza 16 m, larghezza 12 m, altezza 6) con pezzatura indicata in tabella 5.0.6. Il cumulo ha i lati maggiori esposti a est e ovest. Il materiale, durante la formazione del cumulo, non è stato calpestato. Il cippato è stato sottoposto ad analisi chimico-fisica. Il cumulo è suddiviso in due sezioni a loro volta divise in tre livelli:

- basso: altezza da terra 1 m, 5 punti di campionamento, 5 sonde di temperatura;
- medio: altezza da terra 2,5 m, 3 punti di campionamento, 3 sonde di temperatura;
- alto: altezza da terra 5 m, 1 punto di campionamento, 1 sonda di temperatura.

Il cumulo realizzato nella provincia di Ferrara (lunghezza 29 m, larghezza 19 m, altezza 8 m) ha i lati maggiori esposti a nord e sud. Durante la formazione del cumulo, il cippato è stato parzialmente calpestato da una pala meccanica. Il cippato è stato sottoposto ad analisi chimico-fisica. Anche questo cumulo è diviso in due sezioni, in ciascuna delle quali si rilevano due livelli di prelievo del cippato:

- livello basso (a 2,5 m da terra);
- livello alto (a 5,5 m da terra).

Il cippato è stato prelevato in due momenti: a luglio (dopo 4 mesi dalla fine della raccolta) e a settembre.

Pezzatura [mm]	Cumulo (CN)	Cumulo (FE)
	Peso [%]	
< 10	29	48
10-25	65	49
25-50	6	3

**Tabella 5.0.6** Pezzatura del cippato nei due cumuli, uno in provincia di Cuneo, uno in provincia di Ferrara

Livello	Pezzatura grossa (CN)		Pezzatura fine (FE)	
	basso	medio	basso	alto
Ceneri a 600°C [% t.q.]	0,7	1	2,4	2,4
Ceneri a 600°C [%s.s.]	1,7	2,3	4,9	4,9
Umidità [% t.q.]	59,2	56,6	50,9	50,9
PCI [MJ/kg t.q.]	5,05	6,18	7,09	7,09
PCI [MJ/kg s.s.]	15,9	17,42	16,97	16,97

Tabella 5.0.7 Caratterizzazione iniziale dei cumuli

### Cumuli a confronto

Nel mese di luglio, a 4 mesi dalla costituzione del cumulo con materiale mediamente al 58% di umidità, in provincia di Cuneo (pezzatura grossa) si è raggiunto un tenore idrico dell'ordine del 20%, a fronte di perdite specifiche di energia di 4-8 kJ/g di acqua persa.

Nello stesso mese in provincia di Ferrara (pezzatura fine) l'umidità raggiunta non scende al di sotto del 34% (valore medio del livello più alto), a fronte di una perdita di energia di 36 kJ/g di acqua persa (livello basso). Tuttavia, a dicembre la reidratazione del materiale in provincia di Cuneo, dovuta principalmente a precipitazioni nevose, fa in modo che la differenza di umidità tra due cumuli scenda. Di contro, la perdita energetica della pezzatura fine rimane comunque più alta.

Le ragioni di queste differenze, soprattutto considerando i primi 4 mesi di stoccaggio, potrebbero essere ricondotte in parte al parziale compattamento del materiale di Ferrara, unitamente a una pezzatura minore. Questo non ha permesso rapidi flussi di aria umida all'interno del cumulo.

Concludendo, si evince che l'essiccazione del materiale a pezzatura maggiore e non compattato sia più rapida (prescindendo dalla reidratazione a causa dell'andamento climatico differente) e comporti minori perdite energetiche dovute all'evaporazione dell'acqua. Nelle tabelle 5.0.8 e 5.0.9 sono espressi i risultati della sperimentazione.

Livello	perdita peso s.s. [%]		Umidità [% t.q.]		PCI [MJ/kg s]		kJ persi/g H <sub>2</sub> O evaporata	
	luglio	dicembre	luglio	dicembre	luglio	dicembre	luglio	dicembre
Basso	-14,7	-16,7	22,1	30	16,62	16,85	4,1	5,5
Medio	-15,2	-21,1	19,1	34,4	16,68	16,65	8,2	14,5
Alto	n.d.	-7,5	n.d.	37,1	17,0	17,14	n.d.	7,3

Tabella 5.0.8 Parametri relativi al cumulo in provincia di Cuneo (pezzatura grossa)

Livello	perdita peso s.s. [%]		Umidità [% t.q.]		PCI [MJ/kg s]		kJ persi/g H <sub>2</sub> O evaporata	
	luglio	dicembre	luglio	dicembre	luglio	dicembre	luglio	dicembre
Basso	-12,1	-19,6	46,6	35,5	16,7	16,9	36,4	20,3
Alto	-11,7	-18,3	34,3	27,7	17,3	15,0	11,1	14,2

**Tabella 5.0.9** Parametri relativi al cumulo in provincia di Ferrara (pezzatura fine)

### **Polveri e inerti**

Ulteriori aspetti da considerare durante la fase di stoccaggio sono le emissioni in ambiente di polveri e l'aumento degli inerti. Relativamente alla polverosità del materiale, che è in relazione all'umidità dello stesso, questa può provocare eventuali dispersioni nell'ambiente. È il caso degli stoccaggi in impianti di grossa taglia, dove a volte si rende necessario bagnare i cumuli per ottemperare alle prescrizioni autorizzative, mentre il problema generalmente non si pone, date le ridotte quantità stoccate, per gli impianti di piccola-media taglia.

Lo stoccaggio comporta in genere un aumento del contenuto specifico di ceneri. Ciò è dovuto in parte alle perdite di sostanza secca (carbonio e idrogeno, per cui la quota specifica aumenta), ma soprattutto alla movimentazione che, se non condotta con attenzione, aumenta inevitabilmente l'inquinamento della biomassa da parte di inerti.

### **Conclusioni**

In conclusione, si può affermare che stoccare cippato di dimensioni grossolane (10-25 mm per il 65% del peso totale del cumulo) e senza compattamenti in fase di accumulo permette di essiccare il materiale più rapidamente e con minori perdite di sostanza secca a causa dei fenomeni fermentativi.

Nella analisi LCA, avendo a disposizione una cippatrice Claas, viene realizzato un cippato fine, quindi l'essiccazione naturale scoperta può portare a perdite considerevoli di sostanza secca con una diminuzione relativamente bassa di umidità.

#### 5.2.3.2.3 Sistemi di stoccaggio a confronto

È importante sottolineare che un'accurata progettazione dei sistemi di conferimento, stoccaggio e movimentazione del cippato è importante per ottenere un funzionamento efficiente e regolare dell'impianto. Qualsiasi soluzione scelta dovrà essere adatta per tutta la vita dell'impianto.

Tipicamente, le caratteristiche ideali di un buon sistema di stoccaggio sono:

- facilità di consegna con veicoli standard per consentire la possibilità di approvvigionamento da vari fornitori;
- facilità e rapidità di scarico del materiale;
- riparo dall'acqua;
- ventilazione;
- rispetto delle normative di sicurezza antincendio;
- costi ridotti.

Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante in quanto i sistemi di stoccaggio al coperto possono costituire una voce considerevole nei costi di investimento iniziali di un impianto a biomassa, e pertanto necessita di particolare attenzione in fase progettuale.

La scelta del sistema più appropriato dipende dalle condizioni specifiche del sito, e dovrebbe essere fatta cercando il miglior compromesso tra le seguenti caratteristiche:

- adattabilità a diversi sistemi di consegna del cippato;
- disponibilità di ampi spazi di manovra;
- vicinanza e facilità di accesso rispetto al locale del gassificatore;
- costo;

A seconda della taglia dell'impianto e delle scelte progettuali operate, i sistemi di stoccaggio del cippato si possono generalmente classificare in quattro categorie:

- stoccaggio interrato;
- stoccaggio in superficie (aperto o coperto);
- stoccaggio integrato in edifici esistenti;
- stoccaggio in cantieri modulari.

Il confronto viene fatto valutando le temperature interne dei cumuli, le variazioni del tenore di umidità, le variazioni del PCI e le perdite di sostanza secca in diverse condizioni operative. Sono confrontati cumuli di cippato realizzati in quattro modi differenti (ricerche condotte dal Cra-Ing nell'anno 2007):

- con ventilazione naturale (cumulo formato attorno ad una struttura in metallo, costituita da un condotto orizzontale passante e due camini verticali);
- scoperto (soluzione più proponibile per la sua facilità di realizzazione);
- coperto (copertura realizzata con telo geotessile *Top Tex*, tessuto non tessuto di polipropilene non attaccabile dagli agenti ambientali, vita stimata di 5 anni);

- scoperto e compattato (il cumulo di cippato è pressato con un trattore gommato al fine di diminuire il più possibile la quantità di ossigeno all'interno del cumulo).

L'apertura finale dei cumuli ha messo in evidenza come il miglior grado di essiccazione del materiale si ottenga nei cumuli scoperto e coperto [Fonte: *l'informatore agrario*]. Dopo otto mesi il cumulo scoperto (altezza 4 m) ha presentato uno strato umido esterno, con umidità media, ponderando la parte esterna e quella interna, del 50%. Studi sperimentali successivi hanno dimostrato che lo spessore di questo strato non è funzione dell'altezza del cumulo. Conseguentemente, la quota percentuale di materiale umido diminuisce all'aumentare dell'altezza del cumulo.

Il sistema di stoccaggio coperto ha evidenziato una sostanziale uniformità del tenore idrico della massa, attestandosi mediamente al 40%.

Nel cumulo ventilato la riduzione dell'umidità si è localizzata solo nelle immediate vicinanze dei condotti di areazione, mentre il resto della massa non è risultato idoneo alla conversione energetica, visti i valori di umidità rilevati alla fine del stoccaggio (60%).

La compattazione del materiale ha portato a un prodotto per la gran parte inutilizzabile, anzi, si è attestato un aumento dell'umidità (partendo da un materiale al 50% del tenore in acqua si arriva alla quasi totalità della massa con oltre il 65%).

Risulta evidente che gli stoccaggi all'aperto coperto e scoperto siano economicamente e tecnicamente i più vantaggiosi, per tale motivo ora vengono poste a confronto queste due metodologie di conservazione (prove condotte da Cra-Ing nel 2009).

Il cippato è stato raccolto con cippatrice Claas Jaguar 890 ed è stato stoccato in un cumulo coperto con telo geotessile ed in uno scoperto.

Le prove sono state condotte in provincia di Mantova e i metodi utilizzati sono pressoché gli stessi dell'analisi precedente (sonde a tre livelli di altezza); la durata della sperimentazione è stata di quattro mesi. I cumuli sono stati costituiti a febbraio 2009 e l'apertura è stata fatta alla fine del mese di giugno.

I livelli alti, sia nel caso del cumulo coperto che scoperto, sembrano risentire maggiormente dell'irraggiamento solare, evidenziato proprio da una maggiore temperatura rispetto ai livelli inferiori. Le tabella 5.0.10 pone a confronto le analisi eseguite sui due cumuli ad inizio prova e alla fine della stessa.

Cumulo di cippato scoperto	Iniziale	Finale		
		L1	L2	L3
Ceneri a 600 °C [% s.s.]	3,2	4,0	3,6	4,3
Umidità [%]	61,6	24,6	24,9	29,6
Umidità persa [punti %]		37,0	36,7	32,0
PCI [MJ/kg ss]	16,809	16,305	16,564	16,317
PCS [MJ/kg ss]	18,397	17,716	18,017	17,739
Cumulo di cippato coperto	Iniziale	Finale		
		L1	L2	L3
Ceneri a 600 °C [% s.s.]	2,8	3,0	3,9	2,5
Umidità [%]	59,0	21,9	23,4	29,5
Umidità persa [punti %]		37,1	35,5	29,4
PCI [MJ/kg ss]	16,648	16,624	16,696	16,655
PCS [MJ/kg ss]	18,196	18,026	18,069	18,066

**Tabella 5.0.10** Confronto di dati iniziali e finali per il cumulo di cippato scoperto ed il cumulo di cippato coperto

I parametri rilevati presentano sensibili differenze al momento dell'apertura del cumulo. L'aumento delle ceneri a fine sperimentazione appare leggermente più consistente nel cumulo scoperto, probabilmente per il più facile apporto di materiale inerte all'interno del cumulo non protetto da copertura. La differenza maggiore riscontrabile è nel livello più alto (L3). Per quanto riguarda i valori dell'umidità si nota un aumento nel caso di L3 rispetto ad L1 (livello basso) e L2 (livello medio) per quanto riguarda il cippato scoperto, ciò potrebbe essere causato dalle precipitazioni esterne che vanno a reidratare maggiormente il livello più alto del cumulo, quello più esterno, ciò difatti non si rivela nel cippato coperto.

I valori del potere calorifico inferiore rimangono pressoché costanti in entrambi i cumuli. La perdita di sostanza secca, nel caso del cumulo scoperto e coperto, è riassunta nella tabella 5.0.11.

	Perdite s.s. [%]	Umidità finale [%]	Perdita acqua [punti %]	kJ persi/g H <sub>2</sub> O evap.
<b>Cumulo scoperto</b>	-9,5	26,4	35,2	5,0
<b>Cumulo coperto</b>	-11,1	24,9	34,1	3,7

**Tabella 5.0.11** Confronto dei dati medi rilevati dall'analisi del cippato

I risultati messi a confronto mostrano una certa omogeneità. La differenza tra la qualità del cippato stoccato secondo le due diverse metodologie appare del tutto trascurabile. Il telo geotessile non ha preservato in modo particolare il materiale, poiché rispetto al cumulo

scoperto la differenza del valore dell'umidità finale è modesto, dell'ordine di un punto percentuale.

La perdita di umidità è nel caso del cumulo scoperto dell'ordine di 35,2% e nel caso del cumulo coperto dell'ordine di 34,1%, quindi valori estremamente vicini. La situazione è ribaltata per quanto riguarda la perdita della sostanza secca, infatti si registra una perdita maggiore nel cumulo coperto rispetto quello scoperto. I dati rilevati durante le prove di stoccaggio condotte nel 2009 sono in disaccordo con quelli rilevati nel 2007. Mentre nel 2007 si è riscontrata una maggiore qualità del cippato coperto, nel 2009 questa peculiarità non è emersa. Difatti sia le perdite di sostanza secca che la riduzione di umidità tra le due metodologie è pressoché simile tale da non giustificare il costo di acquisto e di movimentazione del telo geotessile.

La differenza tra le sperimentazioni condotte nel 2007 e 2009 riguardano le località ed il periodo di stoccaggio da febbraio a novembre nel primo caso e da febbraio a giugno nel secondo caso. È desumibile quindi da queste esperienze che l'influenza positiva delle coperture si manifesta durante la seconda fase dello stoccaggio, evitando la reidratazione del prodotto a causa delle piogge autunnali, dopo che nei mesi estivi ha raggiunto il minor quantitativo di umidità.

Nell'analisi LCA viene ipotizzato un sistema di stoccaggio all'aperto (evitando il contatto diretto con il terreno e l'erba) con cumulo posto su una superficie in cemento o ghiaia; coperto una parte (nella zona vicina al gassificatore) da una tettoia, e il resto da un telo geotessile.

Le caratteristiche medie del cippato alla fine dello stoccaggio sono espresse nella tabella 5.0.12, tali parametri sono ipotizzati in maniera coerente rispetto le sperimentazioni effettuate da Cra-Ing (l'umidità iniziale del cippato è del 60% t.q.).

perdita peso s.s. [%]	Umidità [% t.q.]	PCI [MJ/kg s]
-15	30	17

**Tabella 5.0.12** Parametri relativi al cumulo ipotizzato nella analisi LCA

### 5.2.3.3 Calcoli relativi alla macrofase di logistica e stoccaggio

Per considerare questa fase nell'analisi LCA è stata per prima cosa calcolata la quantità di sostanza secca necessaria per far funzionare il gassificatore nei due anni che intercorrono tra le varie ceduzioni. Dopo aver fatto questo, la quantità necessaria è stata implementata considerando una perdita del 15% di sostanza secca dovuta allo stoccaggio.

Il processo che analizza la macrofase "logistica e stoccaggio" ha come input le tonnellate di pioppo che servono per avere come output, alla fine dello stoccaggio, una tonnellata di cippato essiccato (umidità 30% t.q.).

I calcoli effettuati sono:

$$\begin{aligned}1 t (U 30\%) &\rightarrow 0,7 tss \\0,7 tss &\rightarrow 1,75 t (U 60\%)\end{aligned}$$

Data la perdita di sostanza secca del 15%:

$$0,7 tss - 0,7 \cdot \frac{15}{100} = 0,7 - 0,105 = 0,595 t$$

Una perdita di sostanza secca di 0,105 implica la necessità di aumentare l'input di cippato tale quale (umidità 60%) di:

$$0,105 \cdot \frac{100}{40} = 0,263 t (U 60\%)$$

Concludendo, la quantità totale di cippato che deve essere immessa come input è:

$$1,75 + 0,263 = 2,013 t (U 60\%)$$

Per concludere il processo sono state immesse le tkm dovute al trasporto (del cippato fresco nel caso A, e del cippato essiccato nel caso B e C) dall'imposto all'impianto di gassificazione e le emissioni in aria di vapore d'acqua dovute all'essiccazione.

## 5.2.4 Il processo produttivo

In questa macrofase viene analizzato l'assemblaggio dell'impianto di gassificazione con i vari componenti di cui è composto e la produzione di energia elettrica e termica da parte dell'impianto.

### 5.2.4.1 L'impianto di gassificazione

L'impianto è costituito da un insieme di componenti atti alla generazione del syngas, alla produzione elettrica e al recupero termico. Completano l'installazione tutti i collegamenti idraulici ed elettrici e i componenti d'impianto ausiliari (i quali non verranno considerati nell'analisi in quanto ininfluenti in termini di impatto rispetto al resto dell'installazione). Partendo da valori nominali di funzionamento, il bilancio di potenza è il seguente: 170 kW di input, pari al potere calorifico della portata di 45 kg/h di cippato con umidità inferiore al 10%, 45 kWe erogati dall'alternatore, 105 kWt disponibili ad una temperatura compresa tra i 75 e i 90 °C e circa 12 kW corrispondenti alle perdite.

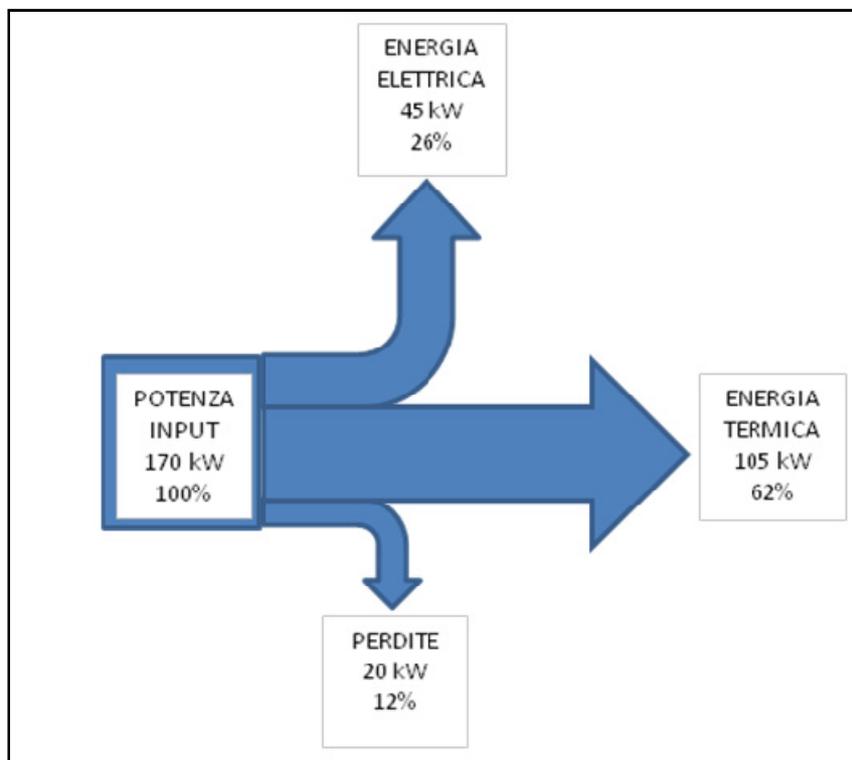


Figura 5.0.21 Bilancio flussi di potenza gassificatore

Grazie a questi dati si può calcolare la quantità di sostanza secca necessaria al funzionamento dell'impianto e di conseguenza, in base alla resa della coltura energetica, agli ettari da coltivare. L'umidità del cippato immesso nel gassificatore deve essere minore del 10%, in maniera cautelativa consideriamo che i 45 kg/h siano di sostanza secca.

$$45 \text{ kg (U 10\%)} \rightarrow 40,5 \text{ kg}_{ss}$$

Sapendo che la potenza di input è 170 kW:

$$170 \text{ kWh} \cdot 3,6 = 612 \text{ MJ}$$

$$\frac{612 \text{ MJ}}{40,5 \frac{\text{kg}_{ss}}{\text{h}}} = 15,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{ss}}$$

Il potere calorifico di 15,1 MJ/kg<sub>ss</sub> relativo ai dati del gassificatore è diverso da quello ipotizzato nell'analisi LCA (pioppo SRF), quindi:

$$\frac{612 \text{ MJ}}{17 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{ss}}} = 36 \text{ kg}_{ss}$$

Essendo all'incirca del 10% l'umidità del cippato inviato al gassificatore, si ha che:

$$36 \text{ kg}_{ss} \rightarrow 40 \text{ kg (U 10\%)}$$

Le ore di funzionamento annuali dell'impianto, a causa di fermi necessari alla manutenzione e di altri imprevisti, sono 7500. Per ragioni cautelative sono considerati i kg di materiale con umidità del 10% (non i kg<sub>ss</sub>) e sono ipotizzate 8000 ore/anno. Così:

$$40 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 8000 \frac{\text{h}}{\text{anno}} = 320.000 \frac{\text{kg}_{ss}}{\text{anno}} = 320 \frac{\text{t}_{ss}}{\text{anno}}$$

Essendo la coltura di pioppo a ceduzione biennale, l'impianto deve funzionare fino alla raccolta successiva, perciò le tonnellate indispensabili sono:

$$320 \frac{t_{ss}}{\text{anno}} \cdot 2 \text{ anni} = 640 t_{ss} \text{ per ogni ceduzione}$$

Conseguentemente è d'obbligo considerare lo stoccaggio, il quale porta a una perdita di sostanza secca (ipotizzata in media nei 2 anni) del 15%. Le tonnellate di sostanza secca devono allora essere implementate:

$$X - X \cdot \frac{15}{100} = 640 t_{ss}$$

$$X = 640 \cdot \frac{1}{1 - \frac{15}{100}} = 752,9 t_{ss}$$

La coltura energetica deve allora produrre 752,9 tonnellate di sostanza secca. In base alla resa del pioppo si ricavano gli ettari totali da coltivare. Ipotizzando la resa con irrigazione (17,5 t<sub>ss</sub>/ha):

$$\frac{752,9 t}{17,5 \frac{t}{ha}} = 43 \text{ ettari}$$

Questo dato, come detto in un capitolo precedente, è inserito nel processo riferito alla coltivazione del pioppo (in SimaPro) in inputs noti da natura (risorse) come: “**Occupation, arable, conventional tillage**” (routine che considera il *land use*).

Inoltre:

$$752,9 t_{ss} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{60}{100}\right)} = 1882,3 t_{tq}$$

Nei 12 anni di vita della coltura sono prodotte:

$$1882,3 t_{tq} \cdot 6 \text{ ceduzioni} = 11.293,5 t_{tq}$$

### 5.2.4.1.1 Layout impianto

In figura viene presentato lo schema a blocchi che riassume la filiera energetica relativa all'impianto costituito da una sezione di trattamento del cippato, presente con tutti i componenti o eventualmente con il solo stoccaggio, e la sezione dell'impianto di cogenerazione.

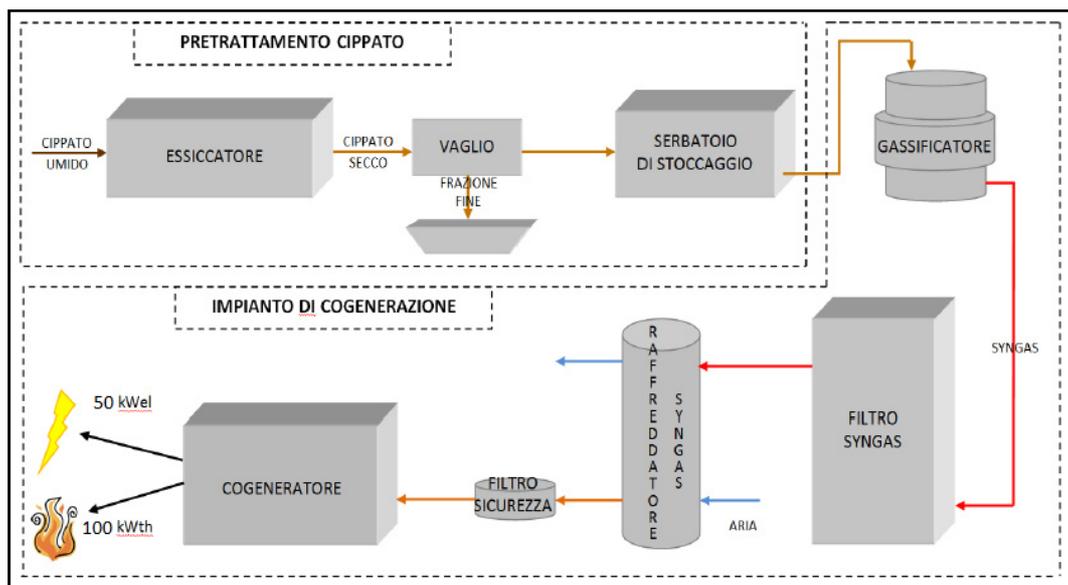


Figura 5.0.22 Schema a blocchi impianto

### 5.2.4.1.2 Trattamento e carico cippato

La biomassa da utilizzare come combustibile per il gassificatore solitamente viene consegnata dalle imprese boschive sottoforma di cippato di dimensioni standard. Questo cippato può essere già idoneo all'impiego, quindi con umidità prossima al 10%, omogeneità nella pezzatura e assenza di polvere, oppure può provenire direttamente dalla cippatrice. In questo caso è indispensabile disporre di un sistema di pretrattamento del cippato composto da :

- Essiccatore;
- Vaglio;
- Serbatoio di stoccaggio accumulo

### 5.2.4.1.3 Essiccatore

Il processo svolto dall'essiccatore è essenzialmente quello di abbattere il grado di umidità del cippato, da valori anche prossimi al 50% (nel nostro caso 30%) fino a valori inferiori al 10%.

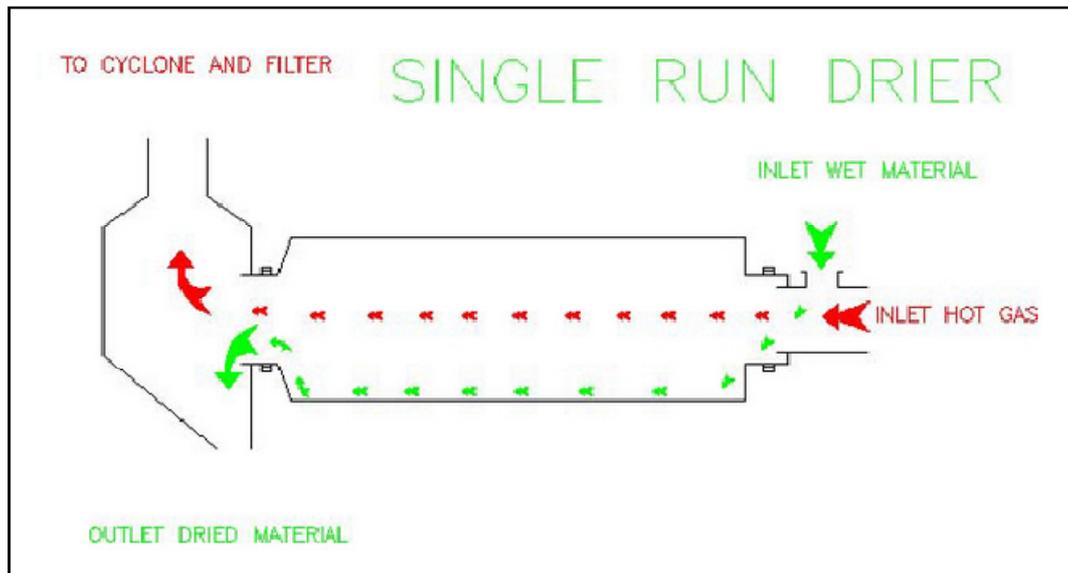


Figura 5.0.23 Schema funzionamento essiccatore

Sono disponibili svariate configurazioni di essiccatori (a nastro, a tamburo rotante ecc), con capacità di carico più o meno elevate; il principio di funzionamento è comune e consiste nel far passare il cippato, sostenuto o meno da una griglia, attraverso un flusso d'aria. Tipicamente l'aria insufflata viene riscaldata per velocizzare e ottimizzare il processo. Nel caso in esame le portate di cippato non sono elevate, è sufficiente quindi un essiccatore di dimensioni contenute e di semplice fattura. Inoltre il calore necessario a riscaldare il flusso d'aria è ampiamente disponibile dal circuito di recupero termico del cogeneratore.

Attraverso questo processo, la portata di combustibile di alimentazione subisce una riduzione della percentuale di umidità in un tempo contenuto permettendo l'impiego di legno cippato anche in condizioni di incertezza riguardo al contenuto di acqua. La diminuzione della percentuale di umidità  $U$  sul tal quale (anche indicata con  $M$ ), si attesta sui 30-35 punti percentuali.

#### 5.2.4.1.4 Vaglio

Anche se le operazioni di cippatura vengono svolte con molta accortezza è inevitabile che all'interno del cippato vi sia una certa percentuale di frazione fine e qualche pezzo dalle dimensioni elevate. La polvere e le particelle troppo sottili, se presenti in quantità elevata possono dare problemi all'interno del reattore, mentre pezzi di legno di grosse dimensioni possono causare il blocco del sistema di carico del combustibile principalmente delle coclee e alla valvole di chiusura. Un sistema di vagliatura consiste in un macchinario capace di realizzare una selezione dimensionale accurata del cippato, permettendo di ottenere un prodotto finale omogeneo e idoneo ad essere impiegato direttamente nel gassificatore.

Esistono diverse configurazioni di sistemi di vagliatura, le principali sono:

- Vaglio a tamburo rotante : composto da un tamburo in rete metallica con sezione delle maglie variabile a seconda delle dimensioni che si intendono separare.
- Vaglio stellare : composto da una serie di alberi rotanti ai quali sono applicate delle ruote dentate chiamate "stelle". Al variare delle dimensioni delle stelle e della loro velocità di rotazione varia la granulometria del prodotto finale selezionato.
- Vaglio a dischi rotanti : principio di funzionamento simile al vagli stellare, solo che gli organi in movimento sono dei semplici dischi rotanti. Anche in questo caso al variare della dimensione dei dischi e del loro interasse variano le dimensioni del cippato separato.

Da precisare che la tipologia stellare consente una vagliatura migliore e con un prodotto finale più omogeneo.

#### 5.2.4.1.5 Serbatoio di stoccaggio

Il cippato viene immesso in un serbatoio di stoccaggio dal quale il gassificatore preleva automaticamente la portata oraria necessaria al funzionamento.

Il sistema di caricamento è composto da una coclea di trasporto e da una balestra movimentatrice atta a mantenere carico il punto di aspirazione della coclea. Quando il sistema di controllo del gassificatore attiva il caricamento del cippato, coclea e balestra ruotano e il cippato viene convogliato verso l'interno del capannone; il funzionamento è di tipo intermittente a seconda della portata richiesta. Il serbatoio di accumulo, attualmente della

capacità di circa 14 m<sup>3</sup> garantisce un'autonomia di funzionamento di circa 2 giorni considerando una portata di alimentazione pari a 45 kg/h e massa volumica del cippato di circa 200 kg/m<sup>3</sup>.

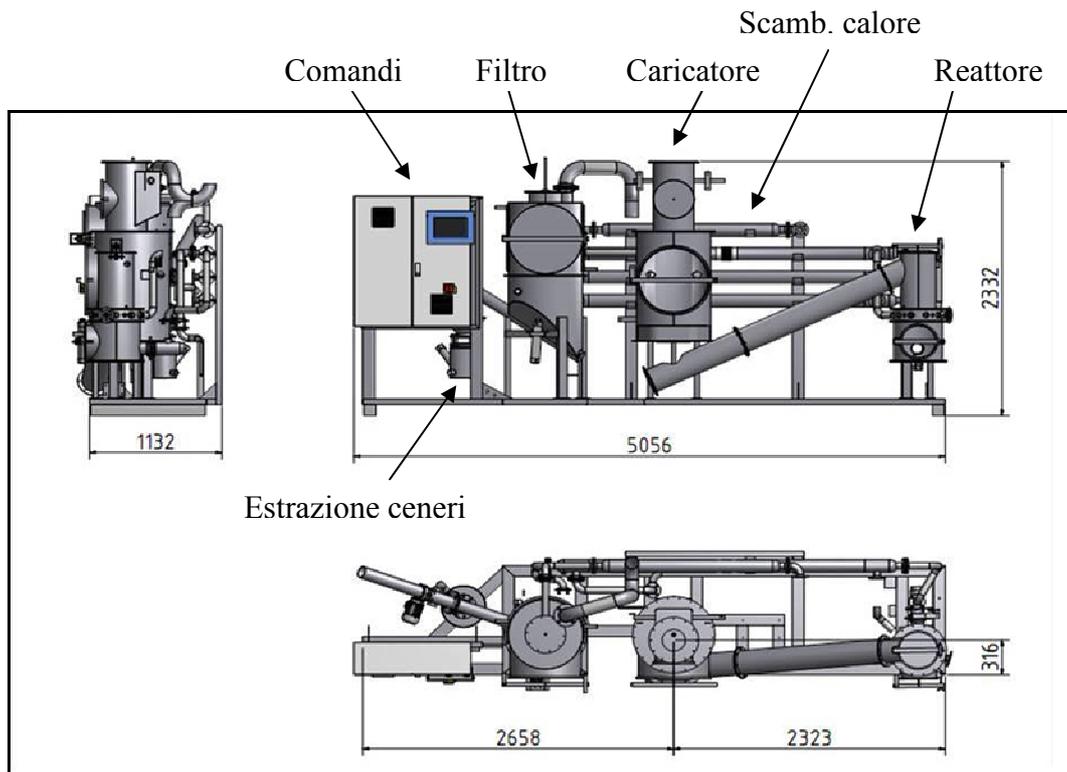
#### *5.2.4.2 Modulo gassificatore*

Il gassificatore nel complesso è costituito da un insieme di componenti che partendo dal cippato caricato dall'alimentatore forniscono in uscita il syngas idoneo all'impiego nel motore a combustione interna.



**Figura 5.0.24** Modulo gassificatore

A prima vista appare come una macchina di semplice fattura e di dimensioni abbastanza contenute (vedi figura 5.0.23); tutti i componenti sono fissati su un'intelaiatura metallica che fornisce solidità al sistema. Nella realtà è il giusto connubio tra una solida base strutturale, una parte di automazione industriale ed una impiantistica. Lo studio e lo sviluppo pratico associato ad ogni singola parte ha permesso di realizzare un sistema affidabile e di garantire funzionamenti prolungati senza inconvenienti e senza la necessità di particolari accorgimenti.



**Figura 5.0.25** Misure e componenti del modulo di gassificazione

Nel seguito della trattazione vengono analizzate le singole parti che compongono il gassificatore.

#### 5.2.4.2.1 Il caricatore di cippato

Proseguendo in accordo con il percorso del combustibile, dalla coclea di alimentazione il cippato arriva al caricatore della macchina, il quale, oltre alla funzione di un piccolo accumulo, provvede a creare una separazione ermetica tra il cippato diretto al reattore e la coclea di alimentazione.

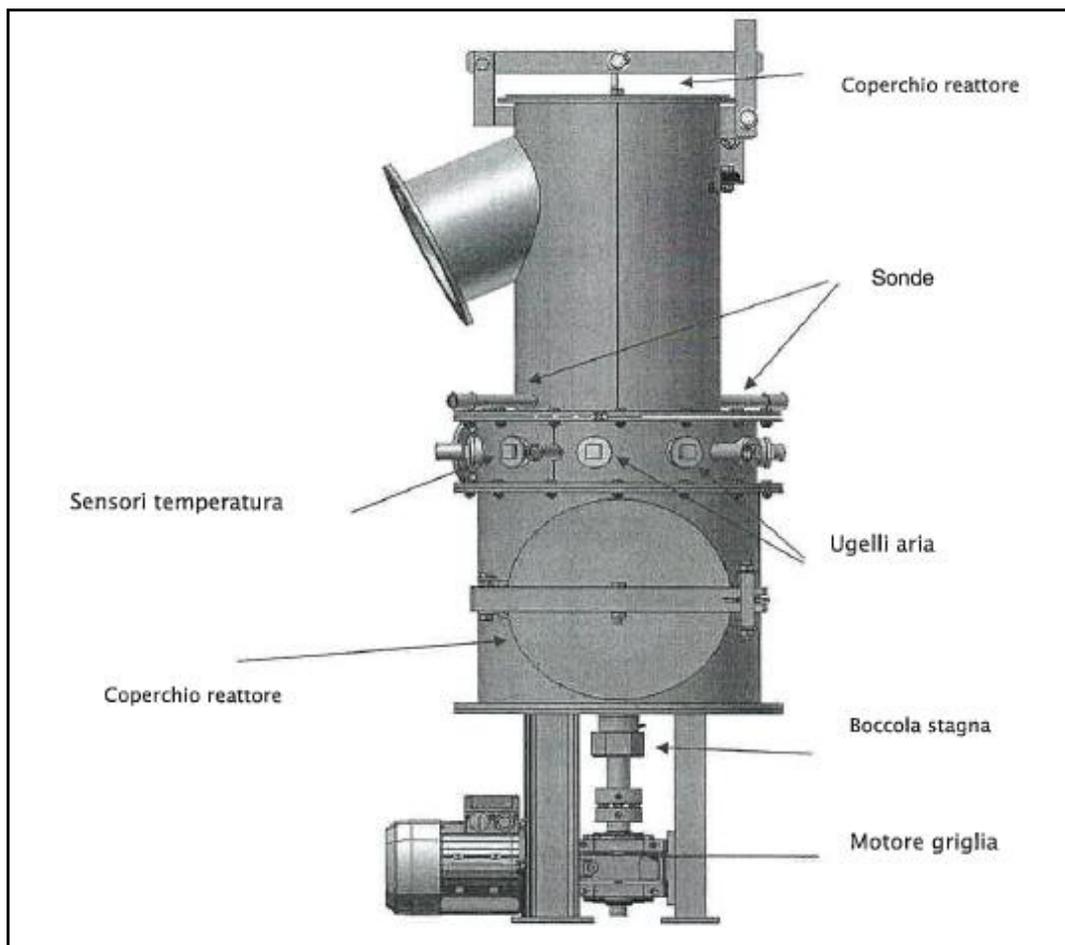
Il caricatore è costituito da un corpo cilindrico, avente all'interno due valvole poste in serie e comandate dall'esterno tramite altrettanti servo pistoni pneumatici. Il funzionamento delle due valvole, che possiamo assimilare a delle valvole a farfalla, è alternato (all'apertura della prima corrisponde la chiusura della seconda), in questo modo è garantita la separazione fisica e la tenuta ermetica. Nel caso di arresto di emergenza avviene la chiusura simultanea delle due valvole.

Dal fondo del caricatore parte una seconda coclea che provvede a convogliare il cippato nel reattore. Riassumendo il processo: il momento di apertura della valvola superiore del caricatore coincide con il funzionamento della coclea proveniente dal serbatoio di stoccaggio e quindi una certa quantità di cippato viene caricata. Successivamente, la chiusura della valvola superiore abilita l'apertura di quelle inferiori e il cippato può proseguire verso il reattore.

Il livello interno del cippato è monitorato in modo continuo da un sistema meccanico che provvede a mantenerlo entro un determinato range e genera l'impulso di attivazione della coclea di carico. Come anticipato la seconda coclea invia il combustibile nel reattore dove viene gassificato. Durante il funzionamento la pressione interna del caricatore è superiore a quella atmosferica, con un valore massimo raggiungibile pari a 100 mbar, corrispondente alla pressione di esercizio del reattore.

#### 5.2.4.2.2 Il reattore

Possiamo definire il reattore come la parte principale del gassificatore, al suo interno avvengono tutte le reazioni chimico-fisiche descritte in uno dei capitoli precedenti. Nel caso in esame è stato considerato un reattore a letto fisso di tipo downdraft, dotato quindi di immissione del combustibile dalla parte superiore, dell'agente gassificante a livello della griglia e estrazione del syngas dal fondo del reattore. Scelta motivata dai vantaggi che questa tipologia comporta, legati specialmente alla qualità del syngas prodotto, in riferimento alla piccola taglia del gassificatore.



**Figura 5.0.26** Il reattore

Il reattore, visto esteriormente, è di forma cilindrica, dotato di due aperture di ispezione, una sulla sezione superiore ed una seconda posta frontalmente appena sotto la griglia.

I collegamenti con il resto dell'impianto sono costituiti da:

- Flangia sulla sommità laterale del reattore alla quale viene collegata la coclea di alimentazione.
- Flangia laterale sul fondo del reattore dalla quale parte il circuito del syngas.

La coclea di alimentazione convoglia il flusso di cippato verso la parte apicale del reattore, dove un sistema meccanico di rilevamento continuo verifica che il reattore sia sempre "carico" e fornisce l'impulso di attivazione della coclea quando il livello interno scende. Dunque, il funzionamento dell'alimentazione è di tipo intermittente a seconda della richiesta. Dalla flangia di uscita del syngas ha inizio il circuito di trattamento e pulizia del gas prodotto fino all'arrivo al cogeneratore.

In questo caso anche il flusso di cenere e char incombusto esce dal reattore assieme al gas, per cui non sono necessari ulteriori collegamenti e sistemi di scarico di questi sottoprodotti.

Nella parte centrale del reattore è presente il restringimento o sezione di gola: a livello del restringimento viene introdotto l'agente gassificante, costituito da aria ambiente pretrattata, e distribuito nel centro del condotto da cinque ugelli in modo tale da far avvenire la reazione di parziale ossidazione dei prodotti della pirolisi. Sotto alla sezione di gola, verso la parte bassa del reattore, è situata la griglia di sostegno del combustibile che non è propriamente fissa, ma è collegata ad un albero di movimentazione che con azioni intermittenti ne provoca la rotazione favorendo il deflusso del materiale e del gas e quindi le reazioni stesse di gassificazione. L'albero di collegamento, opportunamente forato per consentirne il raffreddamento, esce dal fondo del reattore ed è messo in rotazione da un motoriduttore.

Per mantenere sotto controllo le temperature interne del reattore, sia da un punto di vista funzionale che per motivi di sicurezza, a livello della griglia sono installate cinque termocoppie che forniscono in tempo reale i valori della temperatura interna lungo una circonferenza virtuale che circonda e attraversa la zona di ossidazione. Un'ulteriore termocoppia è installata presso il condotto di uscita del syngas e rileva la temperatura dello stesso in uscita verso lo scambiatore di calore.

L'accensione del reattore è automatica e avviene attraverso due resistenze elettriche che diventando incandescenti a contatto con il cippato innescano la reazione di combustione.

#### 5.2.4.2.3 Gli scambiatori di calore

Come già specificato è necessario attuare un raffreddamento del syngas prima dell'impiego. Tale raffreddamento è realizzato attraverso tre scambiatori di calore del tipo tubo in tubo posti in serie.

Il primo scambiatore, collegato direttamente all'uscita del syngas del gassificatore, realizza uno scambio controcorrente gas-aria; il calore recuperato, infatti, preriscalda il flusso di aria, impiegata come agente gassificante, indirizzata al reattore.

Il secondo scambiatore è caratterizzato da uno scambio controcorrente gas-acqua. In questo caso il calore recuperato contribuisce a creare la totale energia termica messa a disposizione dal cogeneratore. In uscita dal secondo scambiatore la temperatura del syngas deve essere compatibile con i materiali di costruzione del sistema di filtrazione, intorno ai 100 °C; per questo vengono realizzati salti termici di oltre 200°C lato gas grazie a superiori coefficienti di scambio e alla maggiore lunghezza (circa doppia) dello scambiatore.

Il terzo scambiatore, funzionalmente simile al secondo ma di lunghezza inferiore, è posizionato sul condotto del syngas in uscita dal filtro e diretto al motore, il  $\Delta T$  realizzato è di qualche decina di °C lato gas.

Nell'immagine seguente è stato evidenziato l'andamento del flusso di syngas attraverso gli scambiatori e il percorso che le ceneri incombuste compiono nel recuperatore. Il verso indicato dalle frecce è rappresentativo della direzione percorsa dal fluido nella parte interna dello scambiatore, mentre esternamente si avrà il flusso, sempre in controcorrente, dell'altro fluido che partecipa allo scambio termico.

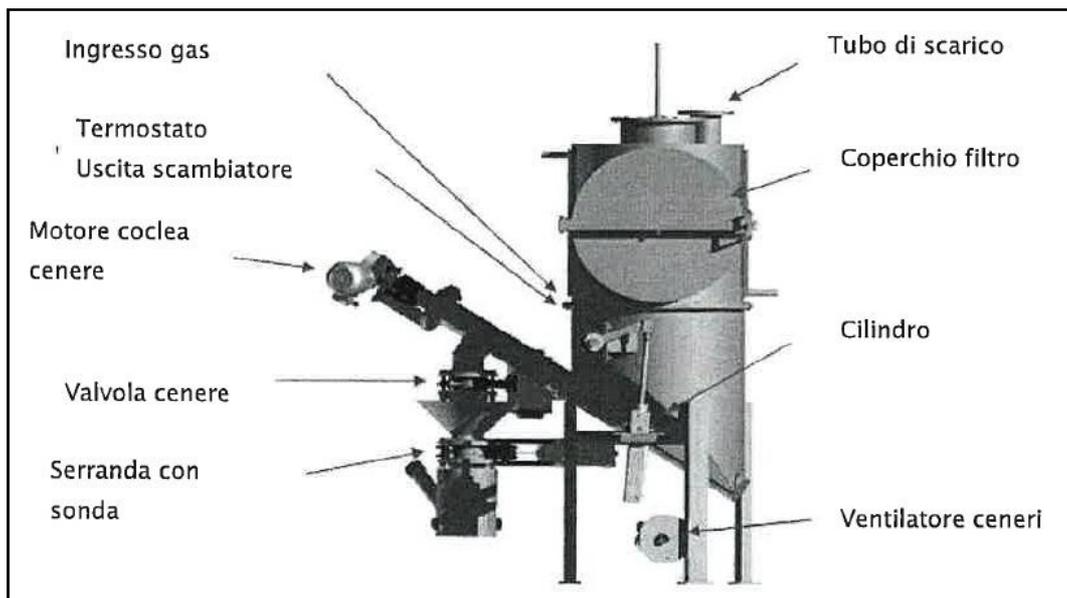


	<i>FLUIDO</i>	<i>SCAMBIATORE</i>
<b>Tratto scambiatore</b>	<b>Percorso INTERNO</b>	<b>Percorso ESTERNO</b>
	SYNGAS	ARIA REATTORE
	SYNGAS	ACQUA RAFFREDDAMENTO
	GAS COMB. CENERI	ARIA REATTORE

**Figura 5.0.27** Percorso dei fluidi nei tre scambiatori di calore

#### 5.2.4.2.4 Il filtro

Uno degli elementi fondamentali dell'impianto è il filtro del syngas. In uscita dal gassificatore si ha un flusso di gas misto a ceneri e char, è indispensabile quindi un'accurata filtrazione. In commercio vi sono diverse tipologie di filtri: a secco, a umido e di tipo elettrostatico. Nell'impianto ipotizzato, sempre in accordo con la semplicità costruttiva che lo caratterizza e con la piccola taglia di potenza, è stato considerato un filtro a secco.



**Figura 5.0.28** Filtro principale e sistema di scarico ceneri

Esternamente il filtro è costituito da un corpo cilindrico a doppia parete dotato di un'apertura di ispezione frontale e collegamenti idraulici con il circuito del syngas, con l'impianto idraulico di recupero termico e con il sistema di scarico delle ceneri. Su un lato è presente un servo pistone pneumatico che aziona il sistema di pulizia. Il tutto è mantenuto a temperatura costante grazie al fluido circolante nella doppia parete che, di fatto, costituisce il primo *step* del recupero termico lato gassificatore. Il secondo è quello relativo allo scambiatore gas-acqua precedentemente descritto. Il filtro, del tipo a secco, può essere comparato ad un filtro a maniche, costituito però da un unico condotto filtrante realizzato in materiale tessuto. Le temperature di funzionamento devono essere limitate per impedire il degrado del materiale che compone il filtro (circa 100°C).

Il syngas giunge dallo scambiatore ed entra dalla parte inferiore internamente alla manica filtrante, cenere e polveri vengono trattenute mentre il gas prosegue oltre ed esce dalla parte superiore del corpo cilindrico verso il cogeneratore.

Periodicamente interviene il sistema di pulizia e rigenerazione del sistema filtrante costituito da uno scuotitore meccanico azionato dall'esterno che provoca la precipitazione della cenere accumulata sul tessuto verso il fondo del contenitore dove una coclea provvede all'estrazione e al convoglio verso il sistema di scarico.

Il sistema di filtrazione è pressoché esente da manutenzione, l'unico provvedimento da attuare è quello di sostituire il filtro in tessuto ogni 1500-1800 ore di lavoro, i costi di intervento sono modesti. La tipologia di filtro in questione impone che il gas filtrato abbia un ridotto contenuto di tar (catrami) al suo interno, pena l'intasamento in tempi brevi delle maglie filtranti. Nel caso in esame la configurazione downdraft del gassificatore risponde perfettamente a questa esigenza.

#### 5.2.4.2.5 Il sistema di scarico delle ceneri

Dal fondo del contenitore del sistema filtrante la cenere e il char vengono estratti attraverso una coclea motorizzata che li convoglia verso il sistema di scarico. In tutta questa fase deve essere garantita l'ermeticità del filtro per evitare fughe di gas verso l'esterno. A tal scopo sono installate a valle della coclea due valvole a saracinesca poste in serie con fasi di apertura alternate e chiusura simultanea in caso di arresto di emergenza; con questo accorgimento c'è sempre una separazione fisica tra il filtro e l'ambiente esterno. Dopo le valvole, l'impianto nella sua conformazione base prevede una piccola tramoggia da dove parte la coclea flessibile destinata a convogliare le ceneri fino al contenitore di accumulo posto esternamente all'edificio. Di norma le ceneri scaricate non sono più attive, però è indispensabile che il contenitore di stoccaggio sia di materiale ferroso per evitare qualsiasi rischio in caso di post-combustione.

#### 5.2.4.2.6 Il filtro secondario di sicurezza

Oltre al filtro principale, lungo il condotto del syngas prima del collegamento al cogeneratore, è installato un ulteriore sistema filtrante di piccole dimensioni con lo scopo di garantire la

pulizia del gas anche nel caso di malfunzionamento del filtro primario. Il sistema è composto da due filtri in serie: un primo in fibra minerale (lana di roccia) ed un secondo di derivazione automobilistica. Sul fondo del contenitore del filtro è presente una valvola idraulica ad apertura manuale predisposta per scaricare la condensa che si forma in questa parte di circuito; le temperature del syngas in questo punto sono nell'ordine dei 70-80°C per questo ci può essere la condensazione del vapore contenuto nel flusso gas e il conseguente accumulo nel filtro. Da precisare che le quantità di condensa in gioco sono estremamente ridotte a causa della modesta frazione di vapore acqueo presente nella composizione del gas. Nel condotto del syngas in uscita dal filtro sono installate due elettrovalvole che bloccano il flusso diretto al motore in caso di emergenza e durante le fasi di avviamento a freddo, quando è necessario scaricare la prima frazione di gas prodotto verso la torcia esterna o in ambiente.

#### *5.2.4.3 Circuiti ausiliari del gassificatore*

##### *5.2.4.3.1 Il circuito idraulico*

Il calore viene recuperato attraverso un circuito idraulico che, come descritto, interessa prima la struttura del filtro e poi gli scambiatori di raffreddamento del syngas. Il circuito è composto da tubazioni in rame o acciaio zincato, valvole degasatrici e di chiusura, pompa circolatrice, vasi di espansione, valvola termostatica di bypass e scambiatore a piastre. Sono tutti componenti standard di un circuito idraulico: nello specifico la valvola termostatica bypassa il flusso termico verso lo scambiatore a piastre fino a che il fluido nel circuito non ha raggiunto la temperatura impostata nella valvola di circa 70°C, questo per far lavorare l'impianto ad una temperatura costante senza salti termici dipendenti dal circuito di dissipazione. Lo scambiatore a piastre si rende necessario per svincolare fisicamente i due circuiti, quello di macchina dal resto, e quindi rendere indipendenti le pressioni e caratteristiche di lavoro.

##### *5.2.4.3.2 Il quadro elettrico*

L'impianto completo è dotato di due quadri elettrici, uno di controllo del gassificatore e l'altro relativo al cogeneratore. Nel quadro del cogeneratore giungono tutti i segnali dei

sensori dislocati nelle varie parti del gassificatore che permettono la gestione di tutte le operazioni di controllo e di funzionamento da parte del microprocessore. Tutti i motori e i pistoni pneumatici vengono comandati secondo le sequenze di funzionamento che dipendono dai segnali di *feedback* trasmessi dai vari sensori.

#### 5.2.4.3.3 Il circuito pneumatico

L'impianto è dotato di un circuito di aria compressa per consentire il funzionamento dei vari pistoni e valvole pneumatiche che controllano e intercettano i flussi di cippato, syngas e ceneri.

#### 5.2.4.3.4 Il circuito dell'aria di alimentazione del reattore

L'agente gassificante, nella fattispecie aria ambiente, viene indirizzato al reattore attraverso tutto il circuito dedicato comprendente, oltre che ai due preriscaldatori, anche il ventilatore che genera il flusso. Si tratta di un ventilatore con girante con pale rivolte all'indietro, capace di realizzare un salto di pressione prevalentemente statico per far fronte alle perdite di carico di tutto il circuito. L'aspirazione avviene in parte direttamente dall'ambiente attraverso una comune valvola appositamente tarata ed in parte dalla tramoggia di uscita della cenere e del char dal sistema di filtrazione, in questo modo viene scongiurato un eventuale accumulo di gas uscito dal filtro con il flusso di ceneri scaricate. La portata di aria in ingresso viene prima filtrata da un apposito filtro intercambiabile.

#### 5.2.4.3.5 Il tubo di scarico esterno e torcia

La prima accensione dell'impianto e le riaccensioni dopo tempi di fermo elevati impongono che il syngas di prima produzione non venga inviato al cogeneratore, in quanto le basse temperature del reattore nelle fasi iniziali dell'avvio non permettono di ottenere un gas pulito (presenza di tar) e con un potere calorifico sufficiente idoneo alla combustione nel motore. Per ovviare a questo (dopo un periodo di fermo contenuto), all'avvio del reattore, la portata di gas prodotto viene deviata verso l'ambiente esterno per qualche istante in modo da consentire

l'entrata in regime del reattore. Nel caso di primo avviamento della macchina o al riavvio in seguito di manutenzione invasiva è necessario bypassare il syngas prodotto per un tempo più elevato. Questo perché quando il reattore viene completamente svuotato, per procedere al riavvio, deve essere caricato preventivamente con una certa quantità di carbonella che comporta la produzione di un gas estremamente sporco ed inutilizzabile.

#### 5.2.4.4 Caratteristiche tecniche impianto di gassificazione (materiali)

Nel gassificatore vengono impiegati diversi materiali a seconda della funzione e della loro localizzazione. Alcuni hanno semplici funzioni strutturali, altri devono lavorare a temperature elevate o in ambienti corrosivi. Il telaio di sostegno, come il caricatore del cippato, la coclea principale di caricamento, la parte esterna del filtro e la coclea di scarico cenere sono realizzati in semplice acciaio al carbonio, come il C45, tipico da carpenteria metallica.

Il reattore, lo scambiatore di calore e il condotto del syngas sono realizzati in acciaio inox del tipo AISI 310. Si tratta di un acciaio refrattario al Cr-Ni austenitico, non temprabile, con ottima resistenza alle alte temperature e all'ossidazione. Resistente allo scagliamento con limite d'impiego di circa 1100°C in atmosfera ossidante sino a circa 1000°C in atmosfera riducente, sempre comunque in atmosfera con presenza di minime quantità di zolfo.

La composizione e le caratteristiche sono rappresentate nella tabella 5.0.13.

	C max	Cr	Ni	Mn max	P max	S max	Si max	Mo	Altri
<b>AISI 310</b>	0,25	24-22	19-22	2	0,045	0,03	1,5	-	N 0,1

**Tabella 5.0.13** Caratteristiche dell'acciaio inox AISI 310

- Resistenza elettrica specifica a 20°C: 0,85 ohm × mm<sup>2</sup>/mm;
- Conducibilità termica a 20°C: 15W/(m × K);
- Calore specifico a 20°C: 500 j/(kg × K);
- Dilatazione termica tra 20°C e 300°C: 17 × 10<sup>-6</sup>m / (m × K);
- Dilatazione termica tra 20°C e 500°C: 18 × 10<sup>-6</sup>m / (m × K);
- Magnetizzabilità: Assente.

L'AISI 310 è molto indicato per la realizzazione di strutture saldate, tipiche degli impianti per trattamenti termici, scambiatori di calore, particolari per forni, impianti per lavorazione liscive

solfitiche, impianti di idrogenazione, impianti di cracking o reforming, industria del vetro, della porcellana, della ceramica e del cemento. Risulta quindi essere il materiale ottimale per la realizzazione del reattore. Come tutti gli acciai inox però possiede una conducibilità termica mediocre rispetto ad altri metalli, risulta necessario dunque realizzare scambiatori con superfici più elevate per realizzare il medesimo scambio termico. Sempre in acciaio inossidabile sono realizzati anche i condotti della torcia esterna e quello di scarico del motore. Il resto del circuito idraulico è composto da tubazione in rame o in acciaio zincato. Reattore, scambiatori e circuito idraulico sono tutti coibentati con della fibra minerale nel caso di parti ad alta temperatura, e con dell'isolante a base di poliuretano per il resto.

Nell'analisi LCA l'impianto di gassificazione è considerato solo tramite i materiali che lo costituiscono. I dati sono stati ricavati con l'aiuto di un ingegnere progettista di gassificatori, il quale ha ricavato, dopo misurazioni e calcoli direttamente in loco, le caratteristiche tecniche di un gassificatore da 45 kW<sub>e</sub>. Queste sono espressi nella tabella 5.0.14, sono trascurati il rame, l'acciaio zincato e la coibentazione (l'errore che si commette è trascurabile).

Componente	Materiale	SimaPro	Peso [kg]
Reattore	Acciaio inox tipo AISI 310	X5CrNi18 (310) I	540
Scambiatori di calore	Acciaio inox tipo AISI 310	X5CrNi18 (310) I	180
Condotto syngas	Acciaio inox tipo AISI 310		
Tubo scarico esterno e torcia	Acciaio inox tipo AISI 310		
Filtro	Mild steel sheet	9S20 I	110
Filtro secondario sicurezza	Mild steel sheet		
Coclea di carico parte esterna	Acciaio al carbonio	C45 I	130
Caricatore cippato	Acciaio al carbonio		
Telaio di sostegno	Acciaio al carbonio		
Coclea scarico ceneri	Acciaio al carbonio		

**Tabella 5.0.14** Pesì e materiali del modulo di gassificazione con le relative routine associate

Nell'assemblaggio del modulo di gassificazione all'interno del *software* SimaPro i pesi sono stati scalati in maniera da poter essere riferiti all'unità funzionale (kWh<sub>e</sub>). Perciò, assumendo un funzionamento in condizioni nominali, per 8000 ore ipotizzate:

$$E_{el} \text{ sviluppata nei 12 anni} = 45 \text{ kW}_e \cdot 8000 \text{ h} \cdot 12 \text{ anni} = 4,32 \cdot 10^6 \text{ kWh}_{el}$$

Il peso inserito nell'assemblaggio è allora:

$$\frac{\text{Peso materiale}}{E_{el} \text{ sviluppata nei 12 anni}} = \text{Peso riferito all'unità funzionale}$$

Inoltre è stato considerato il trasporto del materiale costruttivo dalla fabbrica all'impianto di gassificazione tramite la routine “**Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER S**” (in particolare all'interno di: Processi – Trasporto – Road), la distanza ipotizzata è di 100 km.

#### 5.2.4.5 Il cogeneratore

L'impianto di cogenerazione ipotizzato è costituito da un motore a combustione interna che trascina un alternatore, il motore è dotato di tutti i recuperi termici tipici di un cogeneratore. Questa parte di impianto è praticamente indipendente dalla parte del gassificatore in quanto si limita ad utilizzare come combustibile il syngas.

Nell'analisi LCA il gruppo di cogenerazione è considerato solo tramite il rendimento e con i relativi flussi di potenza elettrica e termica sviluppati.

Partendo da valori nominali di funzionamento, il bilancio di potenza, come espresso in un capitolo precedente, è il seguente: 170 kW di input, 45 kWe erogati dall'alternatore, 105 kWt disponibili ad una temperatura compresa tra i 75 e i 90 °C e circa 20 kW corrispondenti alle perdite.

Essendo il tutto riferito all'unità funzionale [kWh<sub>e</sub>], i calcoli relativi a questa fase sono:

$$\frac{kW_t}{kW_e} = \frac{105}{45} = 2,33$$

Per ogni kWh<sub>e</sub> vengono prodotti 2,33 kWh<sub>t</sub> (ipotizzando un recupero termico ideale del 100%).

Avendo il potere calorifico ipotizzato del pioppo di 17 MJ/kg<sub>ss</sub>:

$$kWh \text{ input} \cdot 3,6 = 612 \text{ MJ input}$$

$$\frac{MJ \text{ input}}{PCI} = \frac{612}{17} = 36 \text{ kg}_{ss}$$

Con una umidità media del 30% del cippato dopo l'essiccazione:

$$36 \text{ kg}_{ss} \cdot \frac{100}{100 - U} = 51,43 \text{ kg cippato essiccato}$$

Quindi per produrre 1 kWh<sub>e</sub> il cippato che deve essere immesso nel modulo di gassificazione è:

$$\frac{51,43}{45 \text{ kWh}_e} = 1,14 \text{ kg cippato essiccato}$$

Per considerare la cogenerazione è stato modificato il record identificato nel *database* del *software* SimaPro come “**Natural gas, burned in cogen 50kWe lean burn/CH U**” (in particolare all'interno di: Processi – Energy – Cogeneration – Gas – Power unit) in “**emissioni e materiali impianto cogenerativo**”. L'unità di misura è il kWh e le puntualizzazioni sono le stesse fatte in precedenza sul *database* Svizzero.

In questa routine sono stati inseriti come input noti a tecnosfera i materiali costituenti l'impianto di cogenerazione e come emissioni in aria le emissioni di un motore cogenerativo da 50 kW<sub>e</sub>. Tutti i dati sono opportunamente scalati per essere riferiti alla produzione di 1 kWh<sub>e</sub>.

Le routine inserite in input noti a tecnosfera sono:

- **Cogen unit 50kWe, common components for heat+electricity/RER/I S;**
- **Cogen unit 50kWe, components for electricity only/RER/I S;**
- **Cogen unit 50kWe, components for heat only/RER/I S.**

Bisogna sottolineare che i materiali a cui si riferiscono queste tre routine non vengono calcolati nello scenario di smaltimento, ma sono considerati solo come carichi ambientali dovuti alla fase di costruzione del cogeneratore.

Le emissioni sono calcolate sulla combustione di gas naturale, l'errore che si commette oltre ad essere irrilevante ai fini della trattazione è anche cautelativo (le emissioni dovute alla combustione del Syngas sono minori).

Tale routine è poi inserita come input in un nuovo processo appositamente creato per considerare sia la produzione di energia elettrica che di calore, il processo in questione è “**Impianto cogenerativo (Pe e Pt)**”. Il quale ha come output la quantità di impianti (nel

nostro caso 1), come input “emissioni e materiali impianto cogenerativo” e come output evitato i 2,33 kWh<sub>t</sub> prodotti per ogni kWh<sub>e</sub> (ipotizzando un recupero del 100%).

La potenza termica evitata è data dal record identificato nel *database* del *software* SimaPro come: “**Heat gas B250**”. L’unità di misura è il kWh e include la produzione, il trasporto e le emissioni dovute alla trasformazione di gas naturale in calore (PCS e 100% di conversione, negli impatti non sono calcolate le infrastrutture).

### 5.2.5 Smaltimento ceneri

In questa macrofase viene valutato lo smaltimento delle ceneri prodotte. Per considerare questo processo è stata creata una routine apposita che calcola unicamente il trasporto del rifiuto (inerte) alla discarica, supposta a 50 km di distanza (**Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER S**) e le emissioni dovute al suo confinamento in discarica (**Waste (inert) to landfill S**).

La quantità di cenere prodotta è circa il 2% del cippato essiccato immesso come input nell’impianto.

### 5.2.6 Assemblaggio del sistema

Per valutare gli impatti relativi all’intero ciclo di vita dell’impianto (ipotizzati 12 anni) si deve creare un assemblaggio.

Nel caso in esame devono essere considerate tutte le macrofasi sviluppate precedentemente opportunamente scalate per essere riferite all’unità funzionale. I calcoli per determinare le quantità da immettere come input sono i seguenti:

$$1 \text{ kWh}_e \rightarrow 1,143 \text{ kg di cippato essiccato}$$

Sapendo che nel processo di essiccazione si perde il 15% di sostanza secca e una quantità di vapor d’acqua proporzionale all’umidità, per produrre 1 kg di cippato essiccato devono essere cippati 2,013 kg di pioppo. Allora:

$$1,143 \text{ kg di cippato essiccato} \rightarrow 2,013 \cdot 1,143 = 2,3 \text{ kg di pioppo}$$

Le ceneri sono:

$$1,143 \cdot \frac{2}{100} = 0,0228 \text{ kg}$$

Per quanto riguarda il processo produttivo l'input è 1 kWh<sub>e</sub>.

Ora si deve associare a questo assemblaggio un *Disposal scenario* (scenario di smaltimento). L'unico componente che deve essere valutato è l'impianto di gassificazione dato che: le ceneri sono già state associate al *waste scenario* di materiale inerte in discarica, il cippato essiccato viene gassificato interamente nei 12 anni (senza lasciare alcun prodotto di scarto) e i materiali costruttivi del cogeneratore sono trascurati.

È stato creato un nuovo *waste scenario* così suddiviso:

- 30% del materiale incenerito (*waste scenario Incineration/CH S*);
- 70% del materiale trasportato in discarica (*waste scenario Landfill/CH S*);

Per il trasporto del materiale in discarica è stata usata la routine “**Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER S**” (in particolare all'interno di: Processi – Trasporto – Road) con una distanza ipotizzata di 100 km.

## 5.3 Valutazione degli impatti

In questo capitolo si analizzano i risultati dell'analisi degli impatti tramite il metodo Eco-indicator 99 (E). La lettera E identifica il peso che viene dato alle categorie di danno, in questo caso ci si riferisce alla prospettiva egualitaria (30% Salute umana, 50% Qualità dell'ecosistema, 20% Risorse).

Sono prima valutate le 4 macrofasi prese singolarmente e poi gli impatti relativi all'intera filiera produttiva (riferendosi alla produzione di 1 kWh<sub>e</sub>) nell'arco di vita ipotizzato di 12 anni.

### 5.3.1 LCIA Coltivazione

Completato l'inventario della macrofase coltivazione è possibile, attraverso modelli predisposti all'interno del software SimaPro, giungere alla valutazione dell'entità con cui ogni singola fase contribuisce al punteggio relativo delle varie categorie di impatto considerate: *Carcinogens*, *Respiration organics*, *Respiration inorganics*, *Climate change*, *Radiation*, *Ozone layer*, *Ecotoxicity*, *Acidification/Eutrophication*, *Land Use*, *Minerals e Fossil fuels*.

Dall'analisi della tabella 5.0.15 è possibile risalire all'entità del danno con cui ciascuna fase contribuisce alla definizione del punteggio totale, relativo alle diverse categorie di impatto considerate nel metodo degli *Eco-indicator 99*.

<b>Calculation:</b>	Analyse
<b>Results:</b>	Impact assessment
<b>Product:</b>	1 kg Pioppo Claas S (of project Pioppo + Gassificatore)
<b>Method:</b>	Eco-indicator 99 (E) V2.07 / Europe EI 99 E/E
<b>Indicator:</b>	Characterisation
<b>Skip categories:</b>	Never
<b>Mode:</b>	Group
<b>Exclude infrastructure processes:</b>	No
<b>Exclude long-term emissions:</b>	No

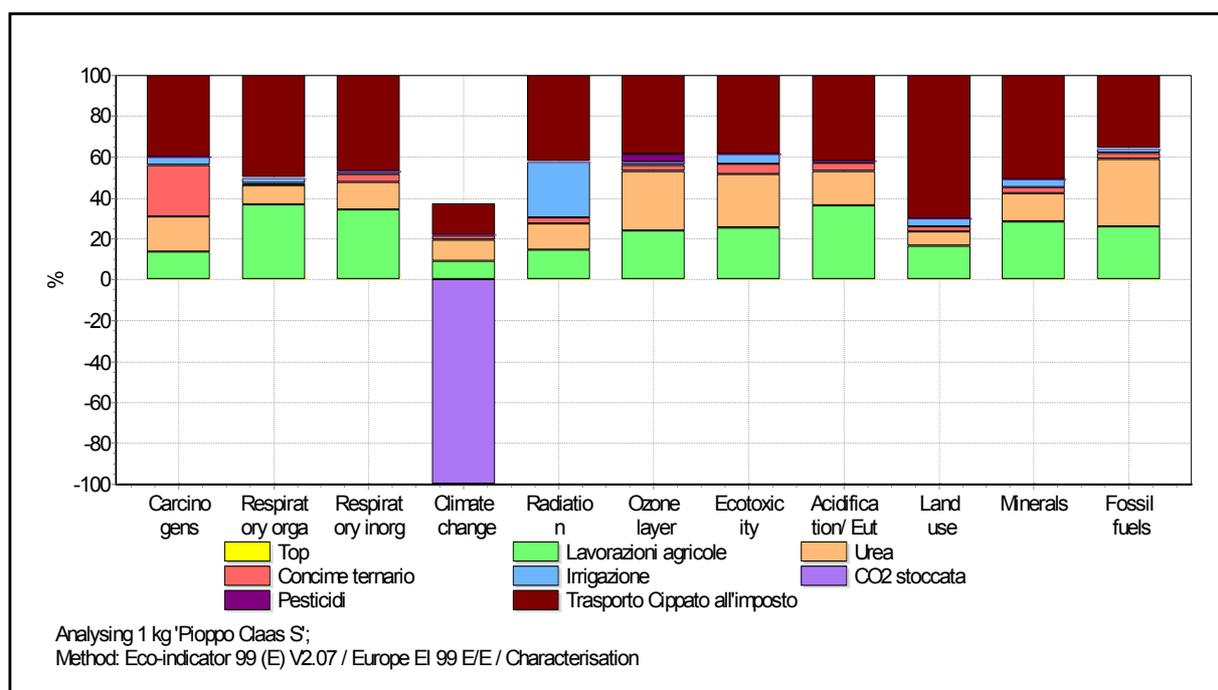
Impact category	Unit	Total	Lavorazioni agricole	Urea	Concime ternario	Irrigazione	CO2 stoccata	Pesticidi	Trasporto Cippato all'imposto
Carcinogens	DALY	1,79E-08	2,38E-09	3,15E-09	4,44E-09	7,58E-10	0,00E+00	2,82E-11	7,11E-09
Respiratory organics	DALY	8,20E-11	3,02E-11	7,66E-12	1,03E-12	1,98E-12	0,00E+00	9,96E-14	4,11E-11
Respiratory inorganics	DALY	7,09E-08	2,43E-08	9,27E-09	3,04E-09	1,01E-09	0,00E+00	7,11E-11	3,31E-08
Climate change	DALY	-1,39E-08	2,82E-09	3,02E-09	5,87E-10	2,47E-10	-2,52E-08	2,08E-11	4,65E-09
Radiation	DALY	2,11E-10	3,09E-11	2,71E-11	5,75E-12	5,83E-11	0,00E+00	5,53E-13	8,87E-11
Ozone layer	DALY	7,05E-12	1,69E-12	2,06E-12	1,93E-13	1,03E-13	0,00E+00	2,84E-13	2,71E-12
Ecotoxicity	PAF*m2yr	2,04E-02	5,21E-03	5,28E-03	1,02E-03	1,03E-03	0,00E+00	3,17E-05	7,83E-03
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	2,14E-03	7,78E-04	3,57E-04	8,06E-05	2,05E-05	0,00E+00	2,18E-06	9,00E-04
Land use	PDF*m2yr	1,82E-03	2,99E-04	1,32E-04	4,14E-05	7,44E-05	0,00E+00	7,74E-07	1,28E-03
Minerals	MJ surplus	5,15E-03	1,46E-03	7,17E-04	1,57E-04	2,01E-04	0,00E+00	4,60E-06	2,61E-03
Fossil fuels	MJ surplus	6,59E-02	1,72E-02	2,15E-02	1,94E-03	1,45E-03	0,00E+00	1,18E-04	2,36E-02

**Tabella 5.0.15** Risultati dell'analisi LCA della macrofase coltivazione, characterisation (categorie di impatto).

Si può notare che per le categorie *Carcinogens*, *Respiratory organic*, *Respiratory inorganic*, *land use* e *Minerals* la fase che contribuisce maggiormente al relativo punteggio è il trasporto del trattore con rimorchio dal campo all'imposto (è considerato anche l'affiancamento alla falcia-trincia-caricatrice). L'impatto conseguente alla produzione dell'urea è presente in tutte le categorie di impatto, ma è in percentuale maggiore in *Ozone layer*, *Ecotoxicity*, *Fossil fuels*.

Per quanto concerne la categoria *Climate change* (associabile ai kg di CO<sub>2</sub> equivalente immessi in atmosfera) si deve sottolineare l'apporto positivo dello stoccaggio della CO<sub>2</sub> durante la crescita degli alberi di pioppo. Il saldo in questa categoria è negativo, vale a dire che, se si considera la sola macrofase coltivazione, si assorbe più CO<sub>2</sub> di quella che si produce.

Il Grafico (istogramma) 5.0.1 esprime in percentuale il contributo che le varie fasi portano alla definizione del punteggio complessivo relativo alle differenti categorie di impatto. In pratica visualizza graficamente, quindi in maniera immediata, quanto appena detto osservando la tabella precedente.



**Grafico 5.0.1** Risultati dell'analisi LCA della macrofase coltivazione, *Characterisation* (categorie di impatto).

Si vede, infatti, che le fasi maggiormente impattanti sono le lavorazioni agricole, la produzione di urea e il trasporto del cippato all'imposto. L'irrigazione è degna di nota solo nella categoria *Radiation*, la produzione di concime ternario nella categoria *Carcinogens*.

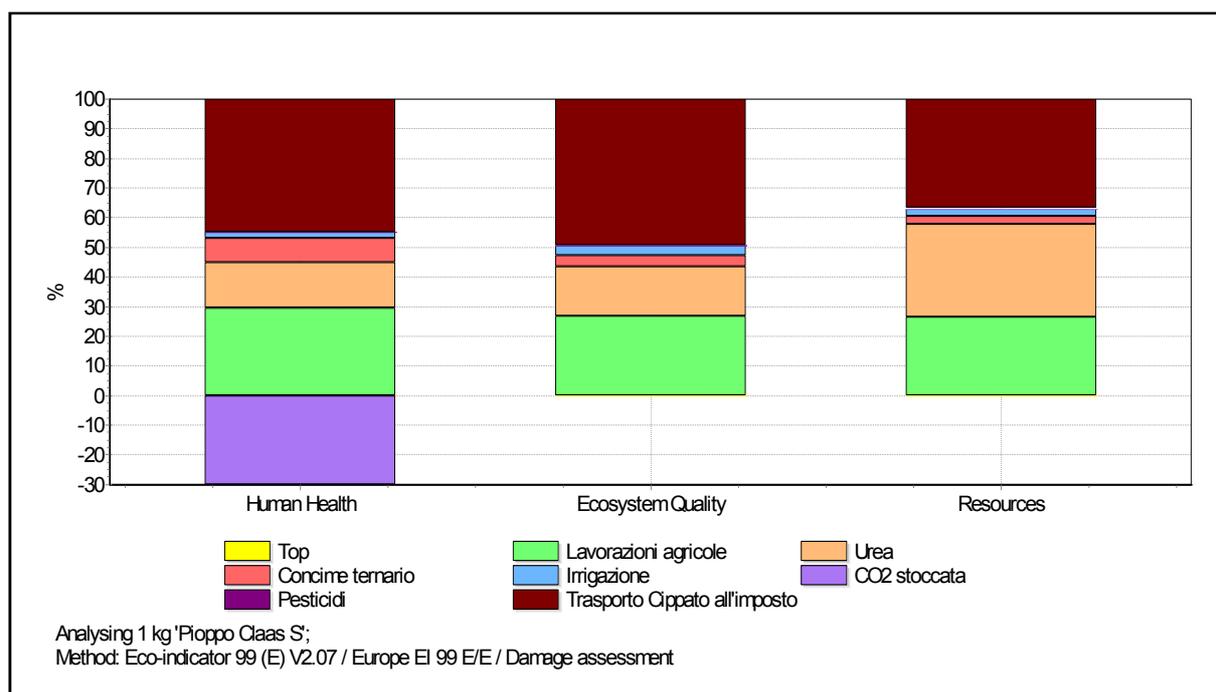
La procedura generale di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto, condotta mediante il metodo degli *Eco-indicator*, prevede che i diversi tipi di impatto siano raggruppati per categorie e, successivamente, venga calcolato un punteggio globale: in tal modo è possibile riferirsi a macrocategorie di impatto (categorie di danno), piuttosto che alle singole categorie di impatto precedentemente analizzate.

Le tre categorie di danno sono:

- **Human Health** (Salute umana); ad essa contribuiscono: *Carcinogens, Respiration organics, Respiration inorganics, Climate change, Radiation e Ozone layer.*
- **Ecosystem Quality** (Qualità dell'ecosistema); ad essa contribuiscono: *Ecotoxicity, Acidification/Eutrophication e Land Use.*
- **Resources** (Sfruttamento delle risorse); ad essa contribuiscono: *Minerals e Fossil fuels.*

Damage category	Unit	Total	Lavorazioni agricole	Urea	Concime ternario	Irrigazione	CO2 stoccata	Pesticidi	Trasporto Cippato all'imposto
Human Health	DALY	7,02E-08	2,96E-08	1,55E-08	8,08E-09	2,07E-09	-3,02E-08	1,21E-10	4,50E-08
Ecosystem Quality	PDF*m2yr	6,00E-03	1,60E-03	1,02E-03	2,24E-04	1,98E-04	0,00E+00	6,12E-06	2,96E-03
Resources	MJ surplus	7,10E-02	1,87E-02	2,23E-02	2,09E-03	1,65E-03	0,00E+00	1,23E-04	2,62E-02

**Tabella 5.0.16** Risultati dell'analisi LCA della macrofase coltivazione, characterisation (categorie di danno).



**Grafico 5.0.2** Risultati dell'analisi LCA della macrofase coltivazione, *Damage assessment* (categorie di danno)

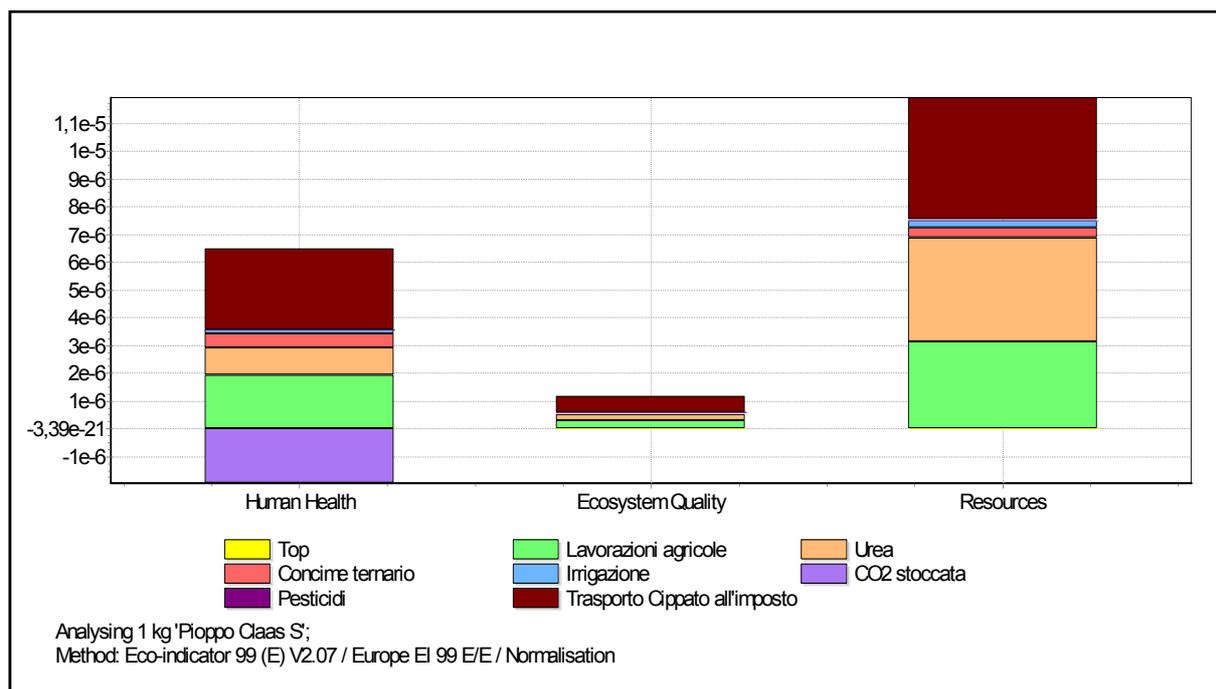
Guardando il grafico 5.0.2 risulta evidente l'apporto positivo dello stoccaggio della CO<sub>2</sub> nella categoria *Human health* e l'impatto del trasporto del cippato all'imposto in tutte le categorie di danno. L'urea dà un contributo importante in *Resources*, le lavorazioni agricole contribuiscono per circa il 30% in ogni categoria di danno.

## Normalizzazione

In questa fase i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono normalizzati, vale a dire divisi per un “valore di riferimento” o “effetto normale” rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, europea o regionale, riferiti ad un determinato intervallo di tempo. Attraverso la normalizzazione si può stabilire la magnitudo, ossia l’entità dell’impatto ambientale del sistema studiato rispetto a quello prodotto nell’area geografica prescelta come riferimento (tabella 5.0.17 e grafico 5.0.3)

Damage category	Unit	Total	Lavorazioni agricole	Urea	Concime ternario	Irrigazione	CO2 stoccata	Pesticidi	Trasporto Cippato all'imposto
Human Health		4,54E-06	1,92E-06	1,00E-06	5,23E-07	1,34E-07	-1,96E-06	7,83E-09	2,91E-06
Ecosystem Quality		1,17E-06	3,11E-07	1,98E-07	4,36E-08	3,86E-08	0,00E+00	1,19E-09	5,77E-07
Resources		1,19E-05	3,14E-06	3,74E-06	3,52E-07	2,77E-07	0,00E+00	2,07E-08	4,40E-06

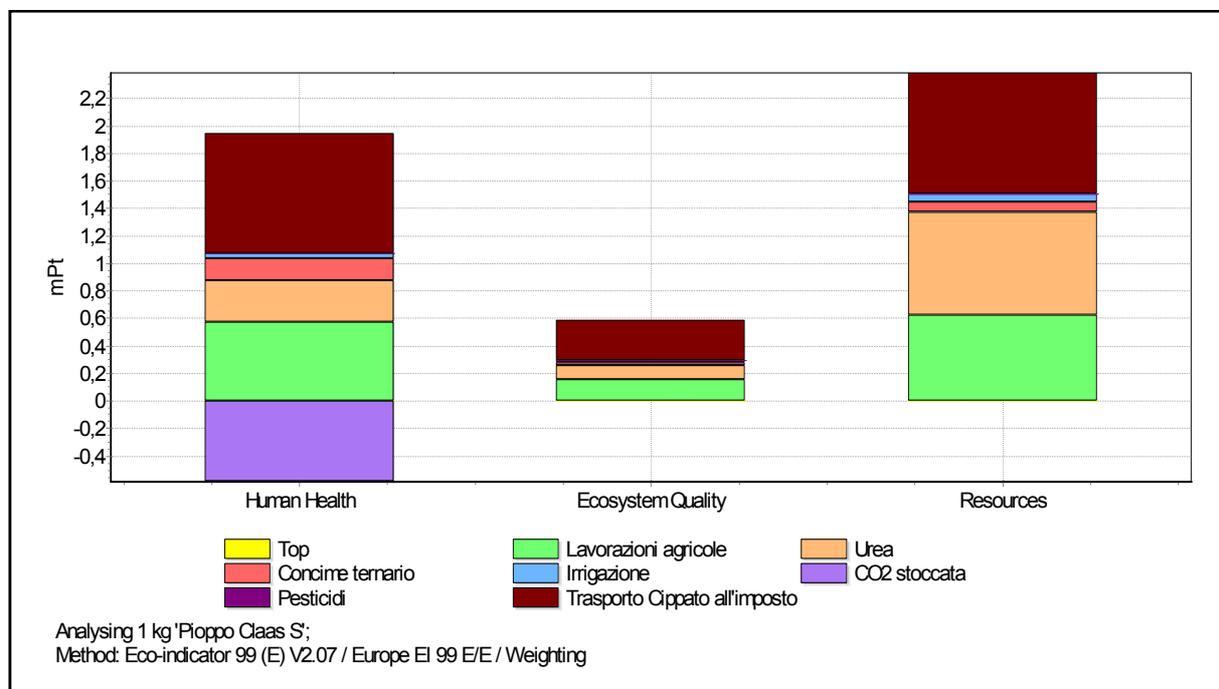
**Tabella 5.0.17** Risultati dell’analisi LCA della macrofase coltivazione, *Normalisation* (categorie di danno)



**Grafico 5.0.3** Risultati dell’analisi LCA della macrofase coltivazione, *Normalisation* (categorie di danno)

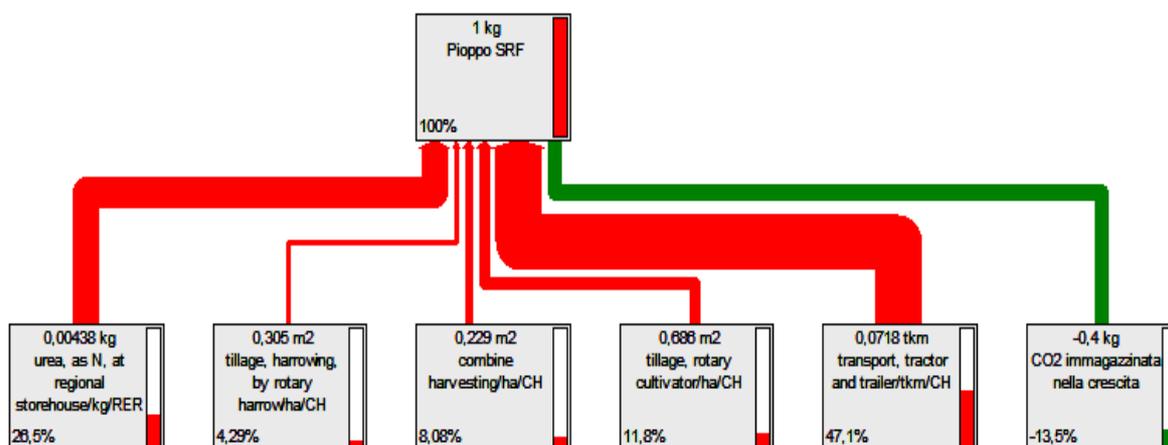
La categoria di danno che dopo la normalizzazione ha maggiore impatto è quella relativa alle risorse, questo perché per le lavorazioni agricole, la produzione di urea e il trasporto sono usati combustibili fossili.

Il grafico 5.0.4 riporta i dati pesati in maniera coerente con il tipo di prospettiva richiamata nel metodo *Eco-indicator 99*.



**Grafico 5.0.4** Risultati dell'analisi LCA della macrofase coltivazione, *Weighting* (categorie di impatto).

La differenza rispetto al grafico precedente è dovuta al fatto che i dati normalizzati hanno un peso differente secondo la prospettiva utilizzata, in questo caso *Egalitarian* (30%, 50%, 20%). Nel diagramma 5.0.1 (il network) è riportato il contributo delle singole fasi alla definizione del punteggio totale dell'impatto, ottenuto con il metodo degli *Eco-indicator 99* considerando tutti i fattori d'impatto.

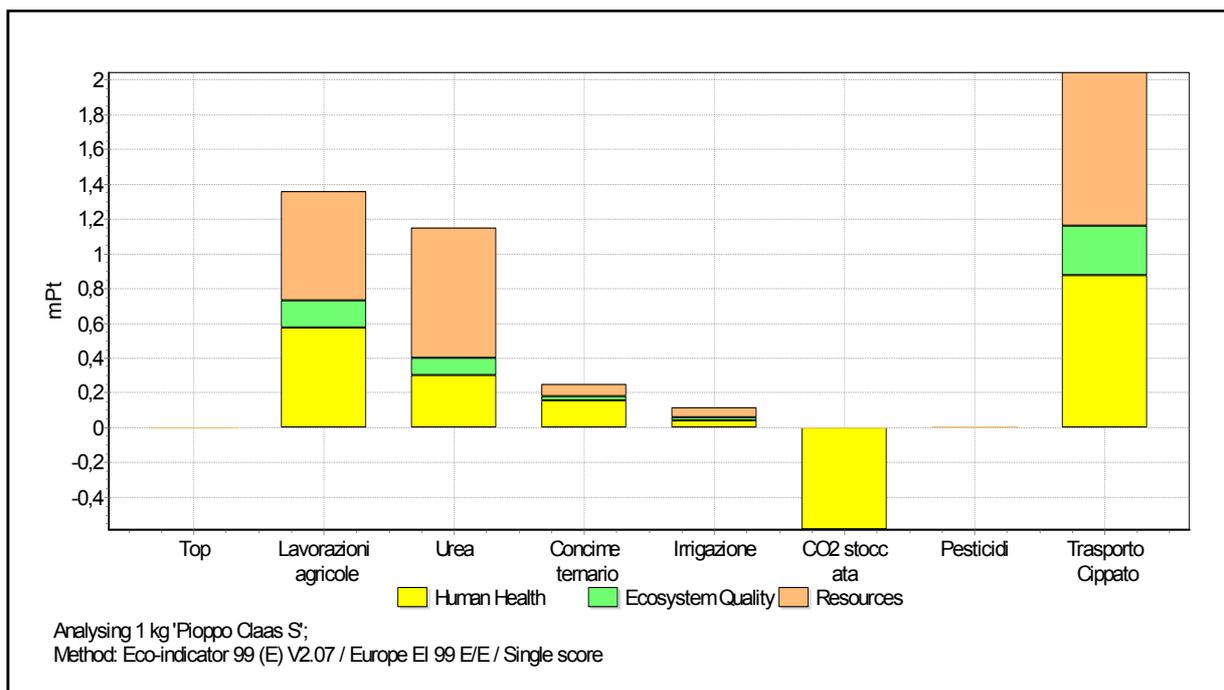


**Diagramma 5.0.1** Diagramma relativo al *Single score P(t)* della macrofase coltivazione (*cut-off* 4%)

Nel diagramma viene evidenziato che la fase a maggior impatto ambientale risulta il trasporto del cippato all'imposto (transport, tractor and trailer): tale fase è rappresentata infatti con una freccia di flusso di maggiore spessore.

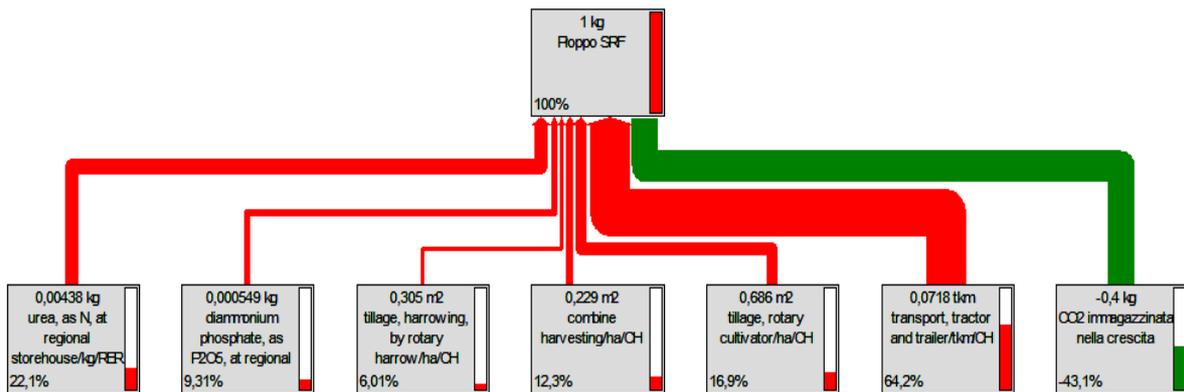
Urea contribuisce all'impatto totale con il 26,5%, lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> dà un apporto positivo con il suo -13,5%. Bisogna sottolineare che tra le lavorazioni agricole effettuate nell'arco dei 12 anni, quelle più impattanti sono la cippatura tramite falcia-trincia-caricatrice (8,08%) e la pulizia dell'interfila (11,8%). Il motivo per cui la lavorazione più gravosa, in termini ambientali, sia la pulizia dell'interfila è da ricercare nel numero di fresature effettuate (3 ogni 2 anni).

Le fasi che risultano da tale network sono le più impattanti dal punto di vista globale, considerando cioè tutti i fattori d'impatto e non singolarmente uno ad uno.

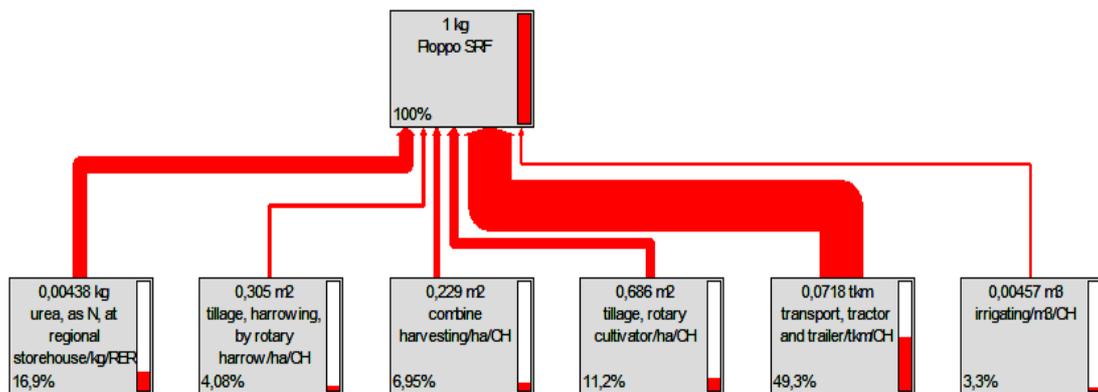


**Grafico 5.0.4** Risultati dell'analisi LCA della macrofase coltivazione *Single score P(t)*

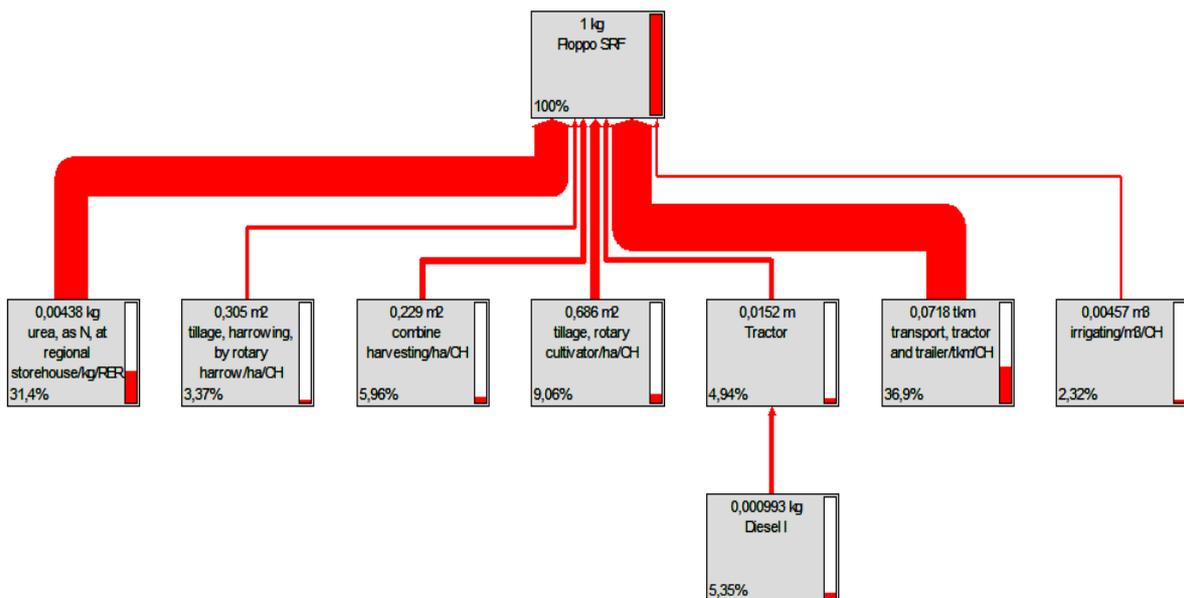
I diagrammi 5.0.2, 5.0.3 e 5.0.4 evidenziano i flussi di impatto relativi alle tre categorie di danno:



**Diagramma 5.0.2** Diagramma relativo alla categoria di danno *Human health* della macrofase coltivazione, Normalisation (cut-off 3%)



**Diagramma 5.0.3** Diagramma relativo alla categoria di danno *Ecosystem Quality* della macrofase coltivazione, Normalisation (cut-off 2%)



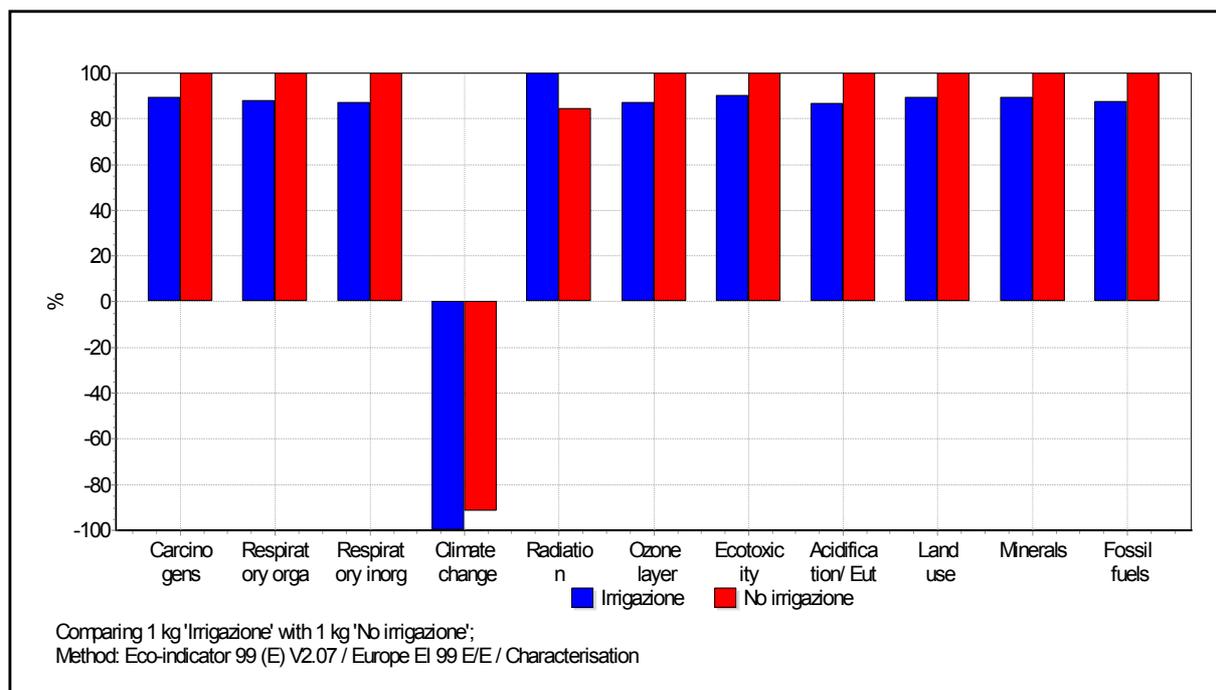
**Diagramma 5.0.4** Diagramma relativo alla categoria di danno *Resources* della macrofase coltivazione, Normalisation (cut-off 2%)

### 5.3.1.1 Confronto tra coltivazione con e senza irrigazione

In questo capitolo si confrontano gli impatti relativi alla macrofase di coltivazione nel caso in cui si ipotizza l'irrigazione e nel caso in cui non viene considerata.

Impact category	Unit	Irrigazione	No irrigazione
Carcinogens	DALY	1,79E-08	1,99E-08
Respiratory organics	DALY	8,20E-11	9,33E-11
Respiratory inorganics	DALY	7,09E-08	8,15E-08
Climate change	DALY	-1,89E-08	-1,73E-08
Radiation	DALY	2,11E-10	1,78E-10
Ozone layer	DALY	7,05E-12	8,09E-12
Ecotoxicity	PAF*m2yr	2,04E-02	2,26E-02
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	2,14E-03	2,47E-03
Land use	PDF*m2yr	1,82E-03	2,04E-03
Minerals	MJ surplus	5,15E-03	5,77E-03
Fossil fuels	MJ surplus	6,59E-02	7,51E-02

**Tabella 5.0.18** Confronto degli impatti tra caso con irrigazione e caso senza irrigazione, Characterisation (categorie di impatto)



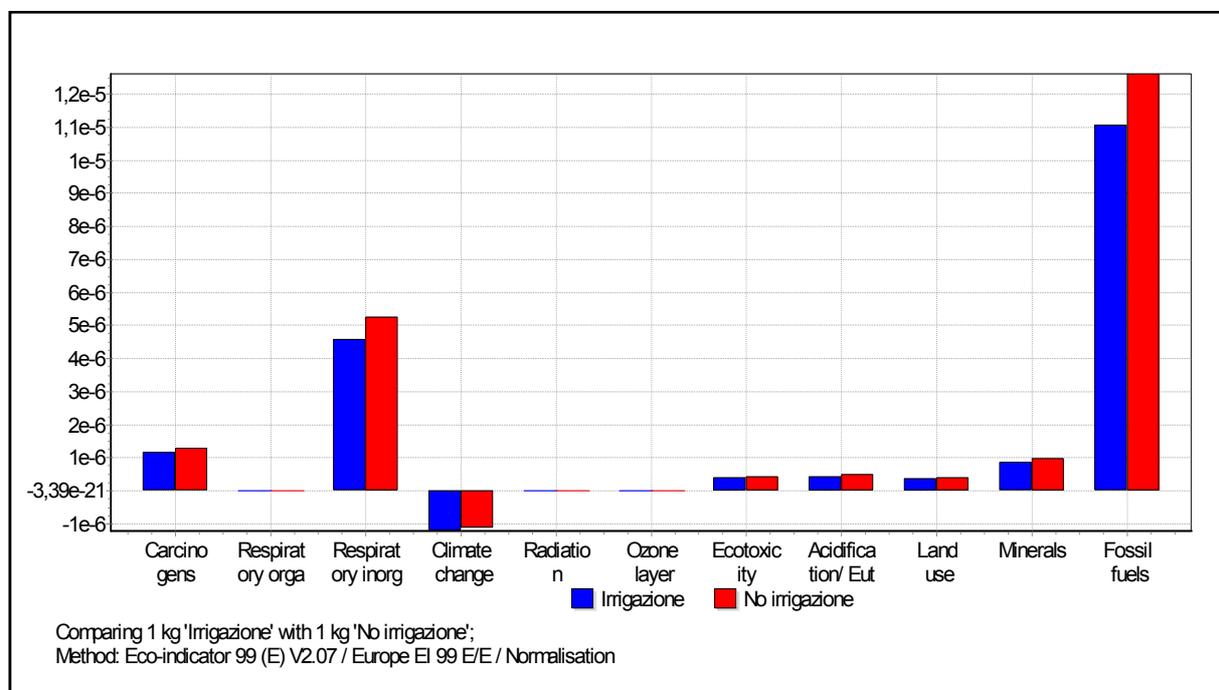
**Grafico 5.0.5** Confronto degli impatti tra caso con irrigazione e caso senza irrigazione, Characterisation (categorie di impatto)

La differenza più rilevante di queste due soluzioni è la resa della coltura, la quale varia da 17,5 t<sub>ss</sub>/ha nel caso con irrigazione e 15 t<sub>ss</sub>/ha nel caso senza irrigazione. La resa minore del secondo caso comporta una maggiore area da coltivare, dato che il raccolto deve essere lo stesso in entrambe le situazioni. La superficie varia da 43 ha (irrigazione) a 50 ha (senza irrigazione), di conseguenza gli impatti dovuti alla lavorazione dei 7 ha in più del secondo caso sono evidenti nel grafico 5.0.5.

Nonostante la maggior quantità di piante che immagazzinano CO<sub>2</sub>, nella categoria *climate change* il saldo è nettamente a favore della coltura con irrigazione. Questo evidenzia il fatto che la CO<sub>2</sub> emessa dalle lavorazioni di un'area maggiore è preponderante rispetto alla quantità stoccata dai pioppi.

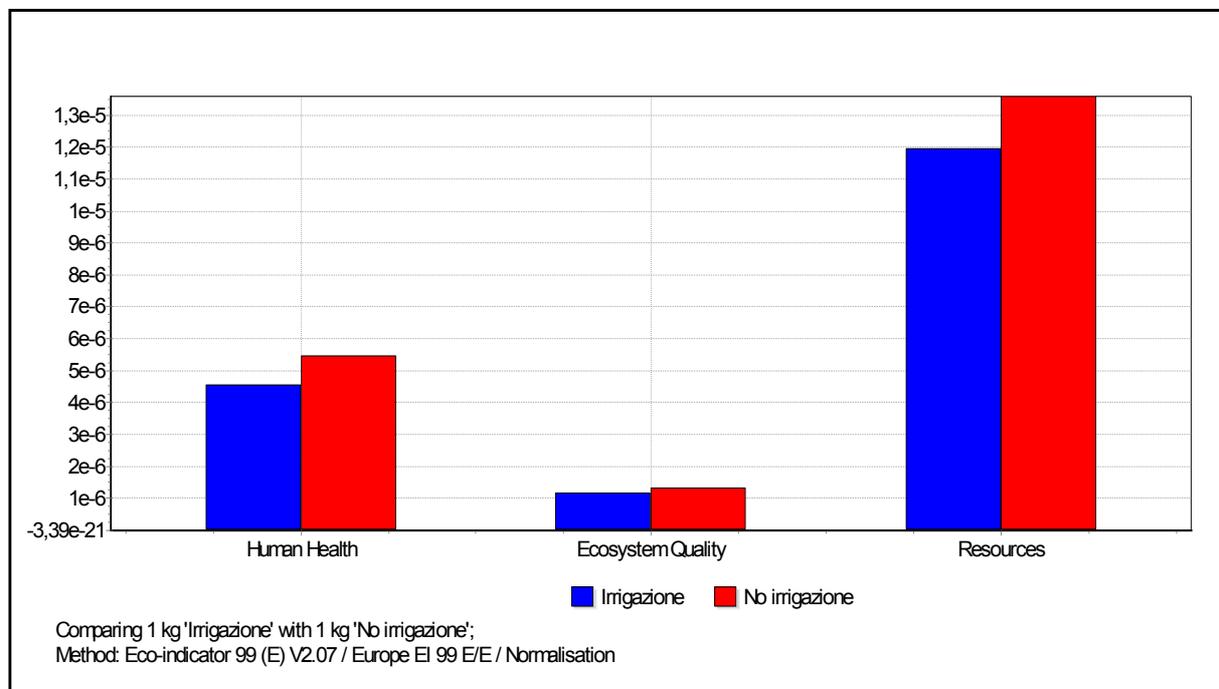
L'unica categoria di impatto a sfavore dell'irrigazione è quella delle radiazioni, situazione attesa visto che era l'unica categoria nella quale l'irrigazione aveva un impatto rilevante (grafico 5.0.1).

Dal grafico normalizzato si nota che le categoria di impatto *radiation*, *Respiration organics* e *Ozone layer* non sono rilevanti rispetto le altre, assumendo un valore prossimo a 0 (grafico 5.0.6).



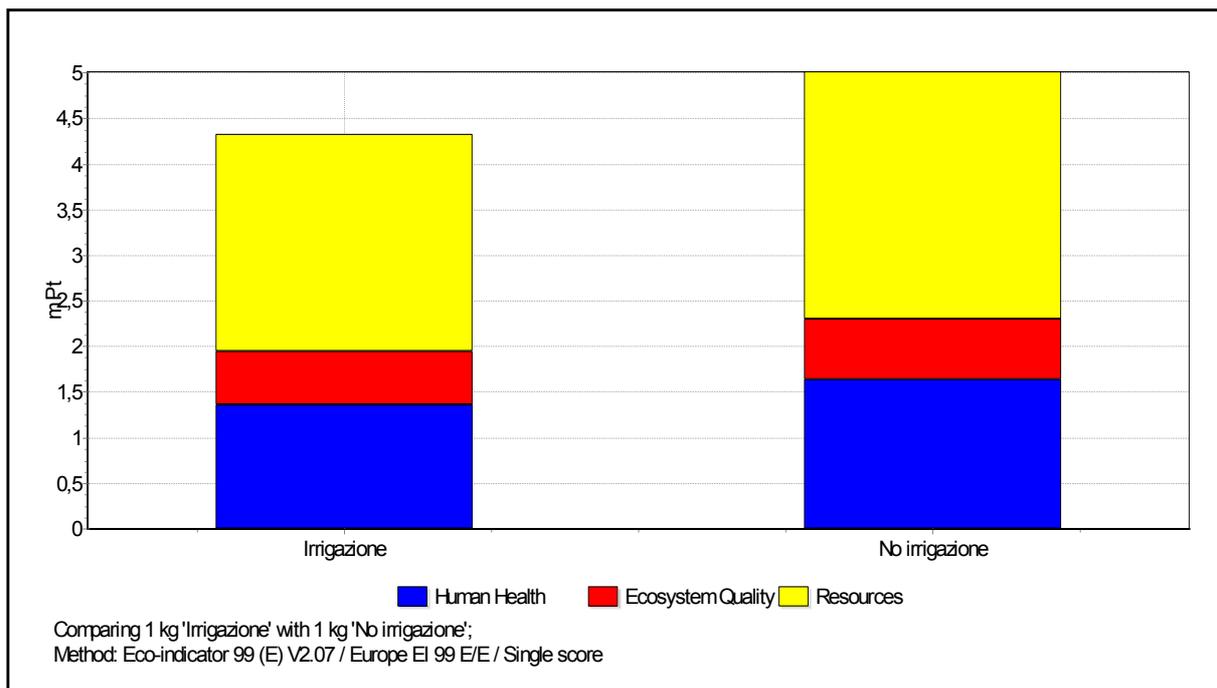
**Grafico 5.0.6** Confronto degli impatti tra caso con irrigazione e caso senza irrigazione, *Normalization* (categorie di impatto)

Inoltre è evidente il vantaggio dovuto all'irrigazione nelle categorie *Fossil fuels*, *Respiratory organic* e *Carcinogens*. Categorie che sottolineano il maggiore carico ambientale causato dalla lavorazione di un'area maggiore di terreno.



**Grafico 5.0.7** Confronto degli impatti tra caso con irrigazione e caso senza irrigazione, *Normalization* (categorie di danno)

Se si valutano le categorie di danno (grafico 5.0.7) il saldo positivo dovuto all'irrigazione è netto. Questo può giustificare un investimento iniziale maggiore (acqua, pompe, ecc) dato che, negli anni, il rientro della spesa è assicurato da un minor uso di combustibile, senza poi considerare il beneficio all'ecosistema e alla qualità della vita.

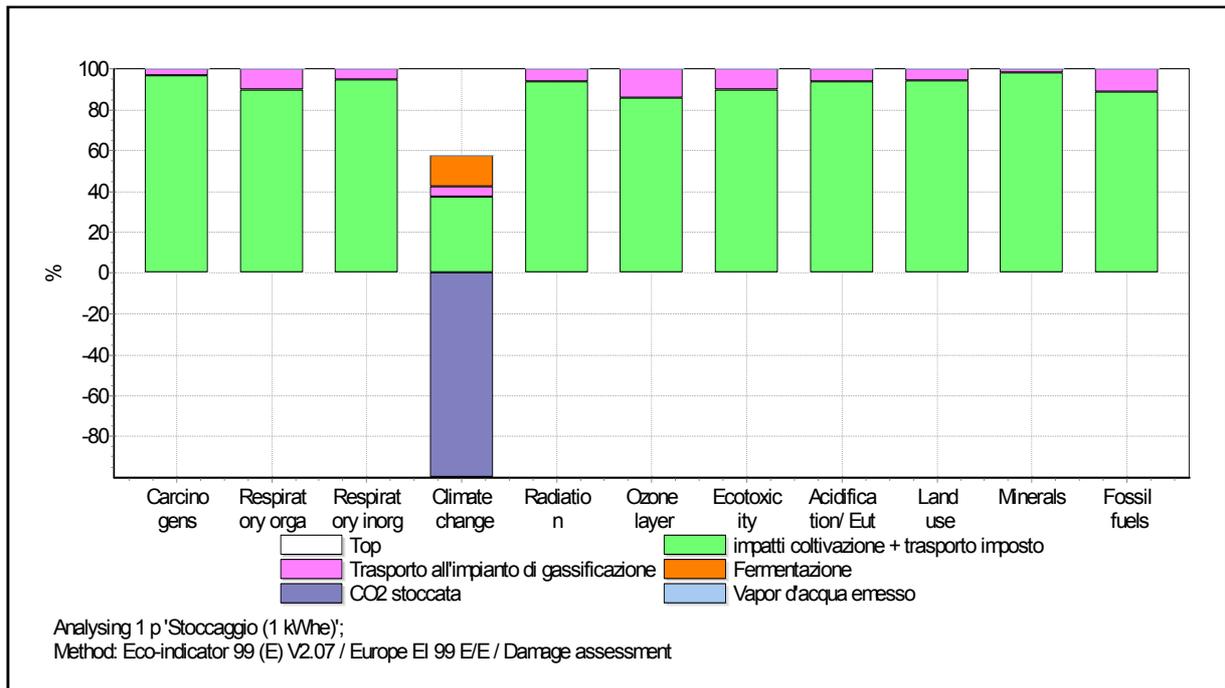


**Grafico 5.0.8** Confronto degli impatti tra caso con irrigazione e caso senza irrigazione, *Single score P(t)*

Nelle LCIA successive si fa riferimento sempre al caso con irrigazione.

### 5.3.2 LCIA Stoccaggio

In questa macrofase, partendo dalla produzione del cippato di pioppo, si considerano gli impatti relativi alla perdita di umidità e sostanza secca della biomassa durante lo stoccaggio, e al trasporto dall'imposto all'impianto produttivo (caso B, distanza 50 km).

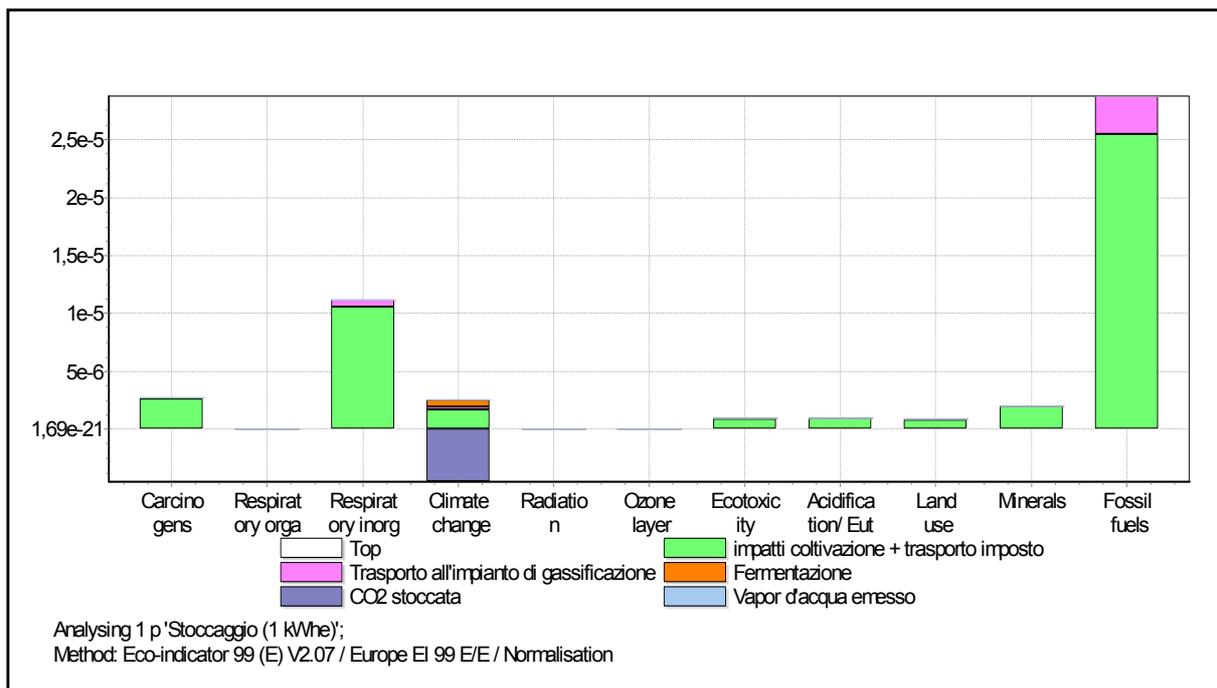


**Grafico 5.0.9** Risultati dell'analisi LCA della macrofase stoccaggio, *Characterisation* (categorie di impatto).

Gli impatti della macrofase coltivazione, tranne lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> durante la crescita degli alberi, sono stati tutti raggruppati in “impatti coltivazione + trasporto imposto”. Ciò che si valuta nella macrofase stoccaggio sono gli impatti dovuti alla fermentazione della biomassa e al trasporto fino all'impianto di gassificazione.

Si nota fin da subito che la fermentazione, come lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, implica un impatto solo nella categoria *Climate change*. L'impatto è negativo, vale a dire che la perdita di sostanza secca comporta l'emissione in atmosfera di circa il 15% della CO<sub>2</sub> che era stata immagazzinata nella fase di coltivazione.

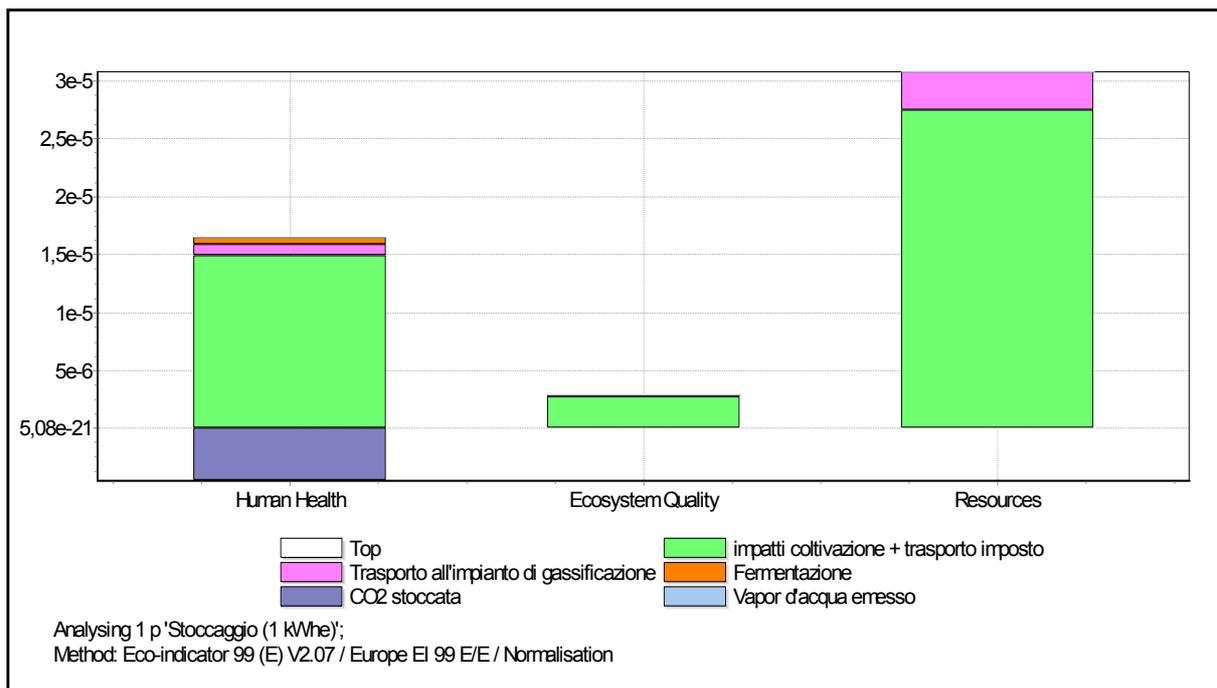
Per avere una idea sul reale impatto dello stoccaggio e del trasporto si deve analizzare il grafico 5.0.10 con i dati normalizzati.



**Grafico 5.0.10** Risultati dell'analisi LCA della macrofase stoccaggio, *Normalisation* (categorie di impatto)

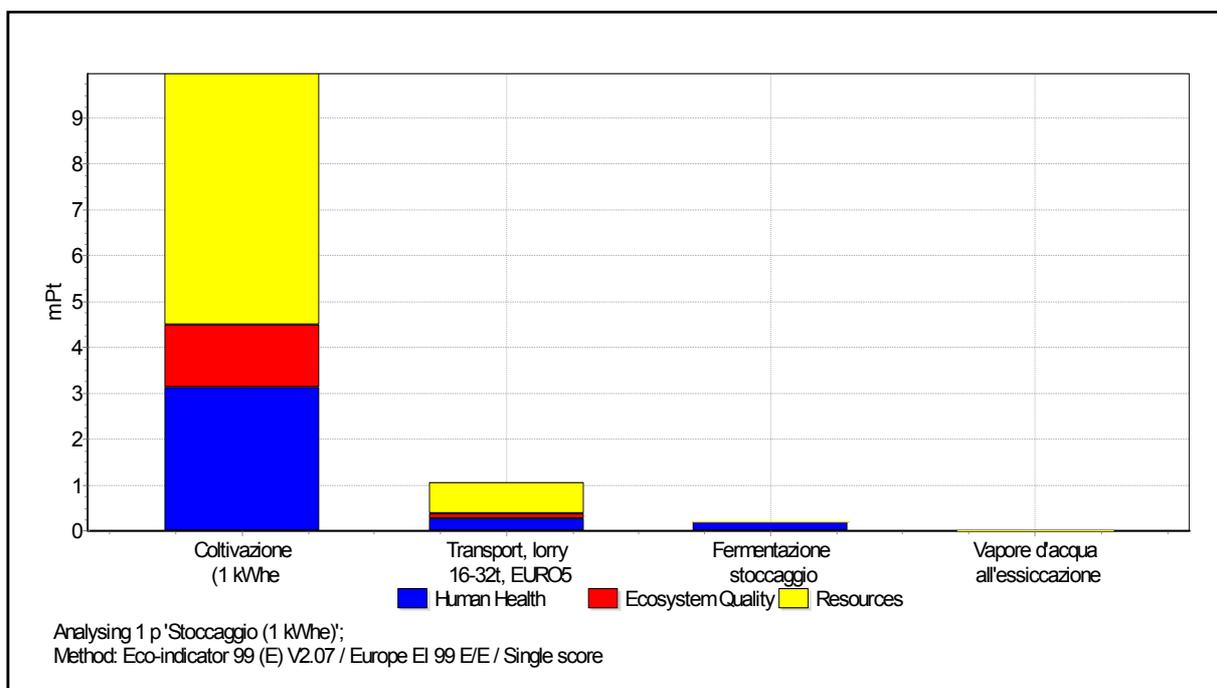
Le categorie che risentono maggiormente di questa macrofase sono *Respiratory inorganic*, *Climate change* e *Fossil fuels*. Nonostante la macrofase di coltivazione sia preponderante in tutte le categorie si deve sottolineare l'aumento dell'impatto dovuto al trasporto del cippato in *Fossil fuels*.

La perdita di umidità (vapor d'acqua) non comporta nessun impatto rilevante ai fini della trattazione.



**Grafico 5.0.11** Risultati dell'analisi LCA della macrofase stoccaggio, *Normalisation* (categorie di impatto)

Analizzando i grafici 5.0.11 e 5.0.12 si nota che la categoria di danno che risente maggiormente dello stoccaggio è quella delle risorse e che il trasporto del cippato è la fase che incide di più rispetto alla fermentazione e alla perdita di umidità.



**Grafico 5.0.12** Risultati dell'analisi LCA della macrofase stoccaggio *Single score P(t)*

### 5.3.2.1 Confronto tra diverse distanze dall'impianto di gassificazione

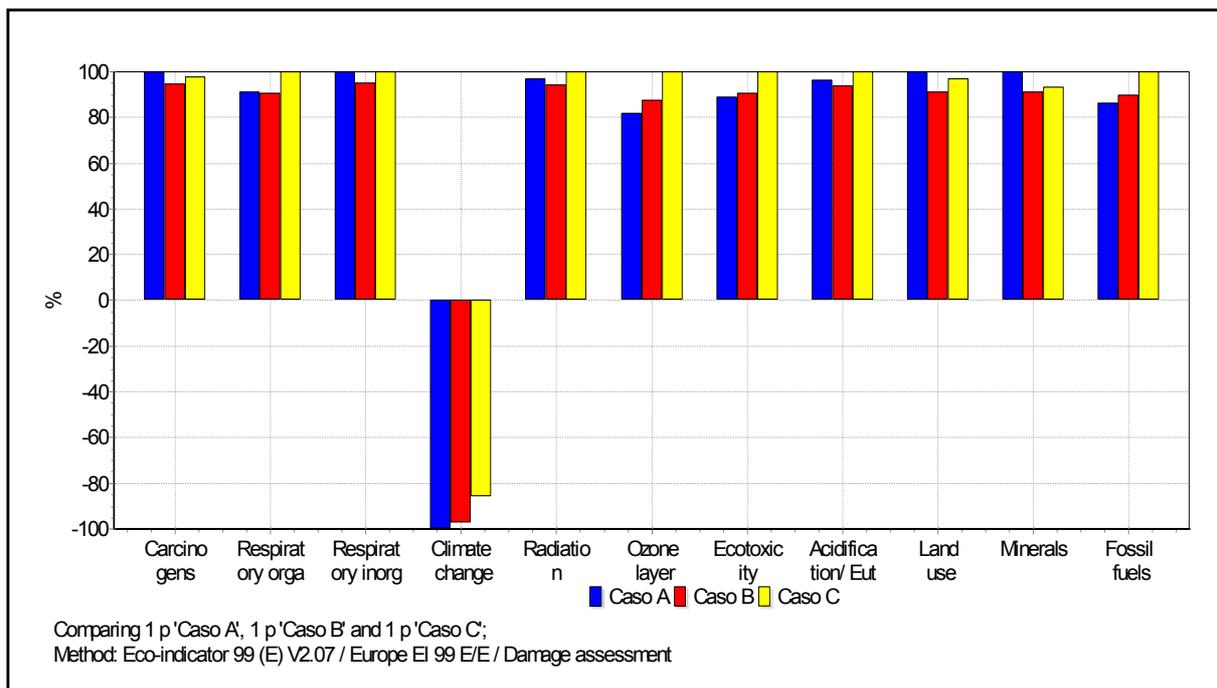
In questa macrofase, come specificato nella fase di inventario, sono messe a confronto tre situazioni logistiche differenti:

- Caso A: distanza tra l'imposto e l'impianto produttivo (impianto di gassificazione) di 10 km;
- Caso B: distanza tra l'imposto e l'impianto produttivo di 50 km;
- Caso C: distanza tra l'imposto e l'impianto produttivo di 100 km.

Nel caso A il mezzo ipotizzato per il trasporto è la stessa trattoria con rimorchio utilizzata nella fase di raccolta del pioppo tramite falcia-trincia-caricatrice Claas, nel caso B e nel caso C, invece, si ipotizza l'uso di autocarri o autoarticolati.

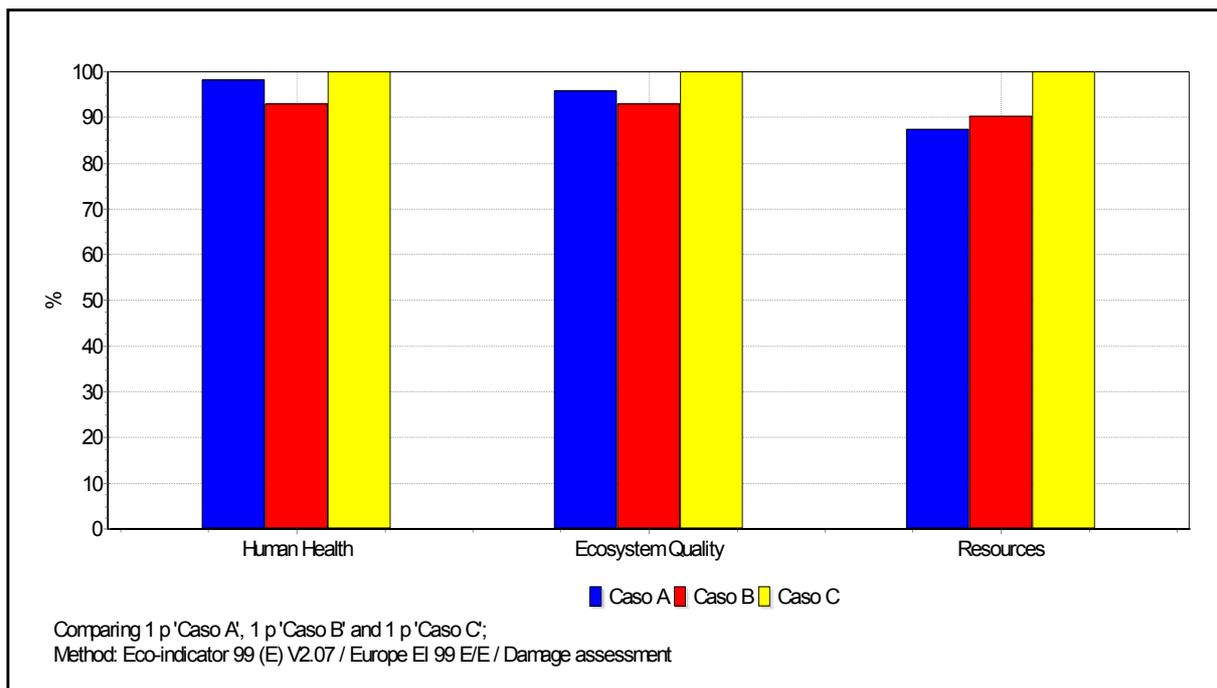
Impact category	Unit	Caso A	Caso B	Caso C
Carcinogens	DALY	4,50E-08	4,25E-08	4,40E-08
Respiratory organics	DALY	2,11E-10	2,10E-10	2,32E-10
Respiratory inorganics	DALY	1,81E-07	1,72E-07	1,81E-07
Climate change	DALY	-3,05E-08	-2,96E-08	-2,62E-08
Radiation	DALY	5,34E-10	5,18E-10	5,51E-10
Ozone layer	DALY	1,77E-11	1,89E-11	2,16E-11
Ecotoxicity	PAF*m2yr	5,12E-02	5,22E-02	5,76E-02
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	5,41E-03	5,26E-03	5,60E-03
Land use	PDF*m2yr	4,89E-03	4,47E-03	4,73E-03
Minerals	MJ surplus	1,33E-02	1,21E-02	1,24E-02
Fossil fuels	MJ surplus	1,64E-01	1,71E-01	1,91E-01

**Tabella 5.0.19** Confronto degli impatti tra caso A, B e C, *Characterisation* (categorie di impatto)



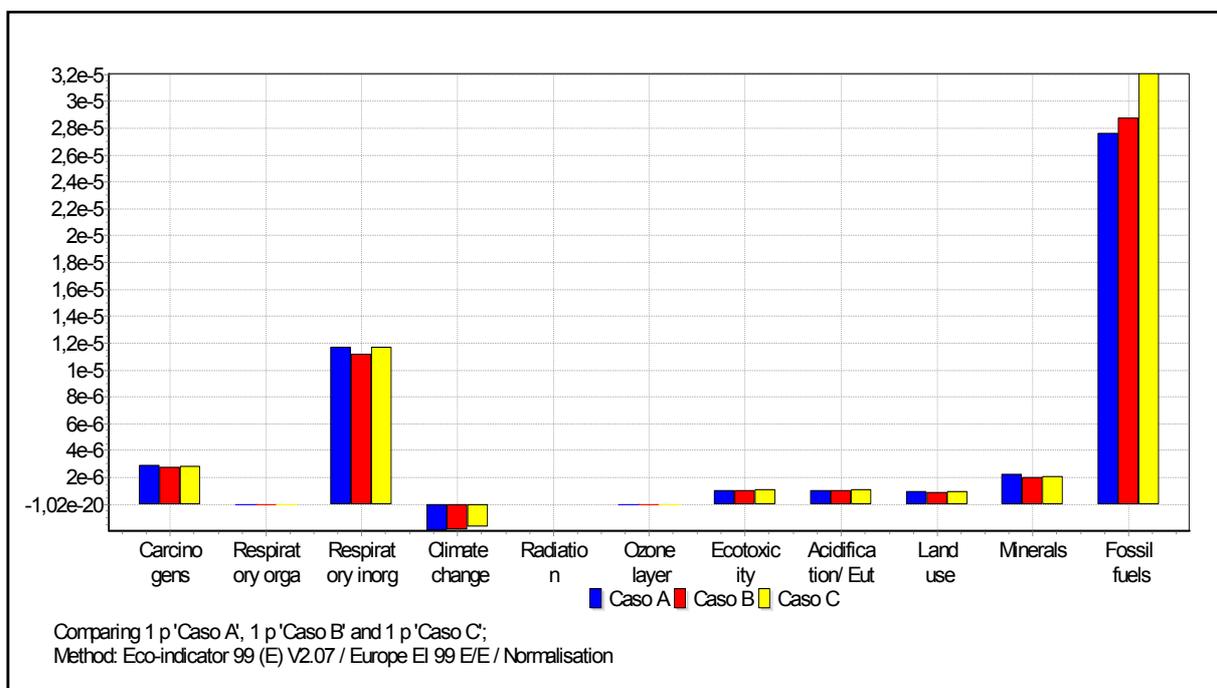
**Grafico 5.0.13** Confronto degli impatti tra caso A, B e C, *Characterisation* (categorie di impatto)

Quello che sorprende analizzando il grafico 5.0.13 è che nel caso A, nonostante la distanza tra imposto e impianto sia minore, nelle categorie *Carcinogens*, *Respiratory inorganic*, *Radiation*, *Acidification/Eutrophication*, *Land use* e *Minerals* l'impatto è maggiore rispetto agli altri casi. La risposta è da ricercare nel tipo di mezzo utilizzato per il trasporto, il quale implica prestazioni minori a parità di distanza con un conseguente inquinamento maggiore rispetto ad un autocarro.



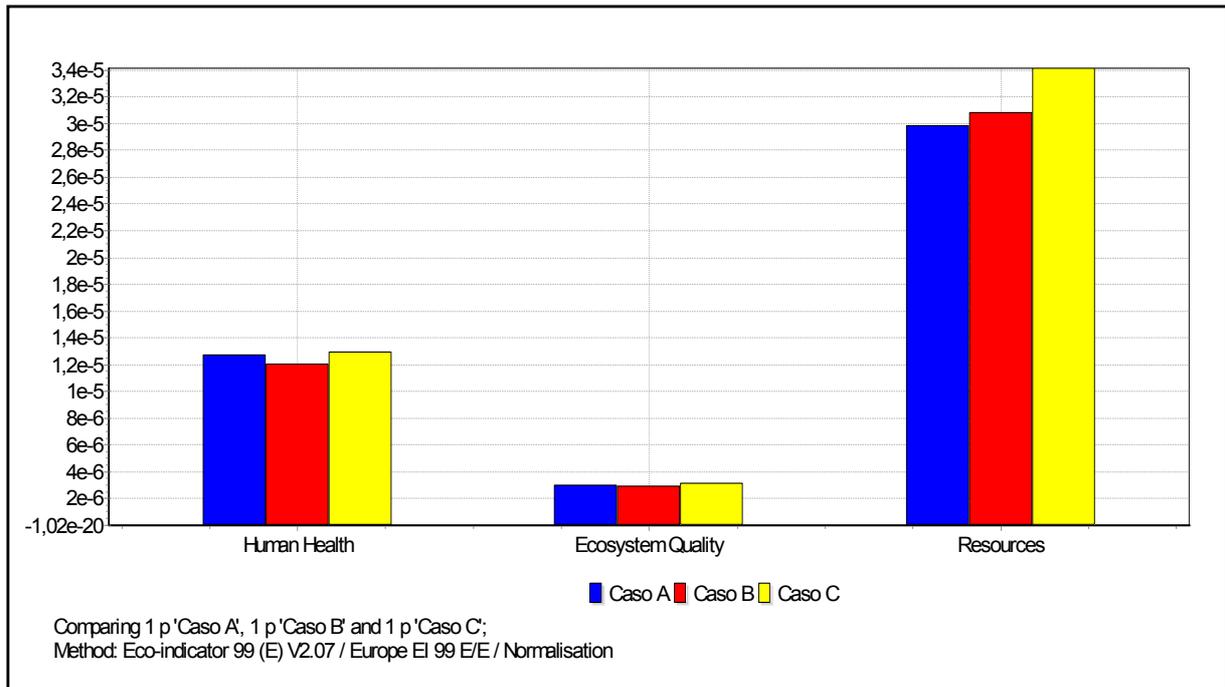
**Grafico 5.0.14** Confronto degli impatti tra caso A, B e C, *Characterisation* (categorie di danno)

Se si considerano le categorie di danno (grafico 5.0.14), in *Human health* e *Ecosystem quality* il caso A ha un impatto intermedio rispetto agli altri due casi, ha invece un impatto minore in *Resources*.



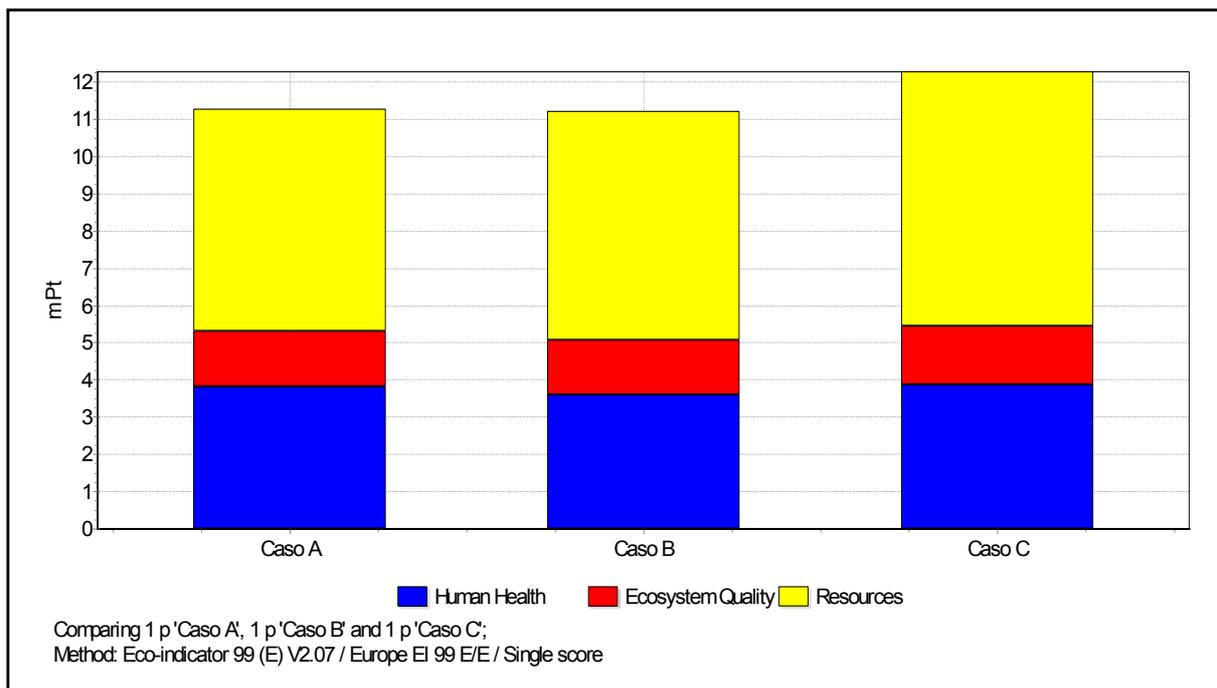
**Grafico 5.0.15** Confronto degli impatti tra caso A, B e C, *Normalization* (categorie impatto)

Normalizzando i dati (grafico 5.0.15), le categorie che hanno un peso maggiore sono *Carcinogens*, *Respiratory inorganic* e *Fossil fuels*. Questo fa capire il vantaggio per quanto riguarda l'uso di minor combustibile dovuto a una minore distanza e lo svantaggio dovuto ad un motore meno prestante (caso A) e ad un carico da trasportare maggiore (il cippato essiccato è in massa minore, circa la metà, rispetto a quello appena raccolto).



**Grafico 5.0.16** Confronto degli impatti tra caso A, B e C, *Normalization* (categorie di danno)

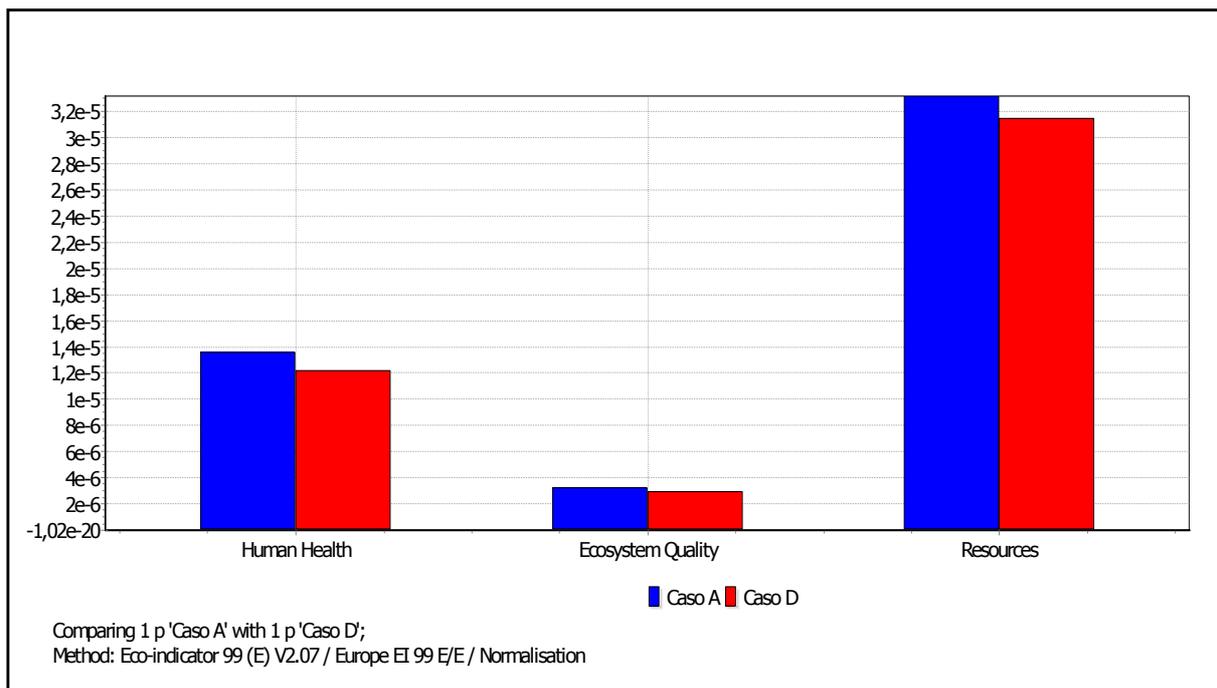
Il grafico 5.0.17, relativo al *Single score*, evidenzia come il carico ambientale del caso A sia pressoché lo stesso del caso B e che il caso C abbia un impatto maggiore, come era prevedibile vista la maggiore distanza (100km).



**Grafico 5.0.17** Confronto degli impatti tra caso A, B e C, *Single score P(t)*

Dopo aver osservato che l'impatto relativo al punteggio totale del caso A è lo stesso che nel caso B, viene ipotizzato il trasporto del cippato tramite autocarro anche nella situazione di distanza minima (10 km).

Il grafico 5.0.18 confronta l'impatto normalizzato (categorie di danno) del caso A e del caso D (trasporto del cippato tramite autoarticolato dopo essere stato essiccato, distanza 10 km).



**Grafico 5.0.18** Confronto degli impatti tra caso A e D, *Normalization* (categorie di danno)

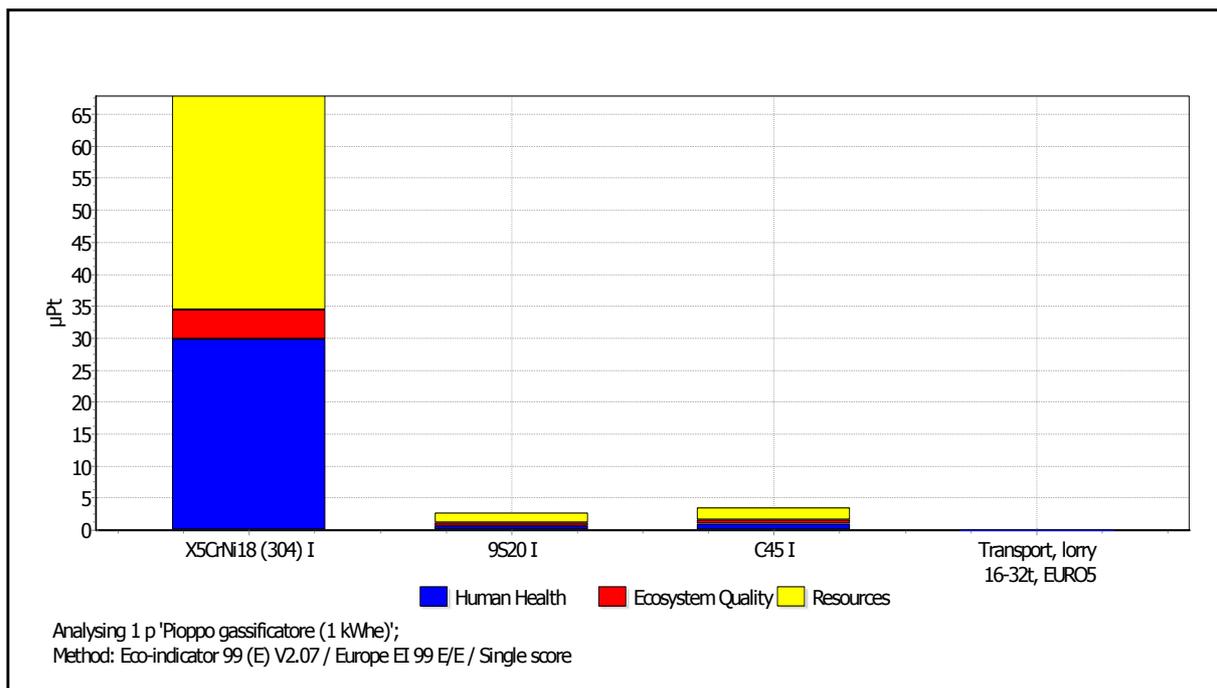
Il carico ambientale è minore in ogni categoria nel caso D, ma bisogna anche considerare il sistema, oltre che in termini ambientali, in termini economici.

Vale a dire che nel caso A non c'è la necessità di stoccare il cippato in imposto con annesso spese di scarico e carico, inoltre, non è necessario l'uso di un autocarro (minore investimento iniziale/spese di trasporto).

Nelle valutazioni successive si fa riferimento al caso B (distanza 50 km).

### 5.3.3 LCIA Assemblaggio impianto di gassificazione

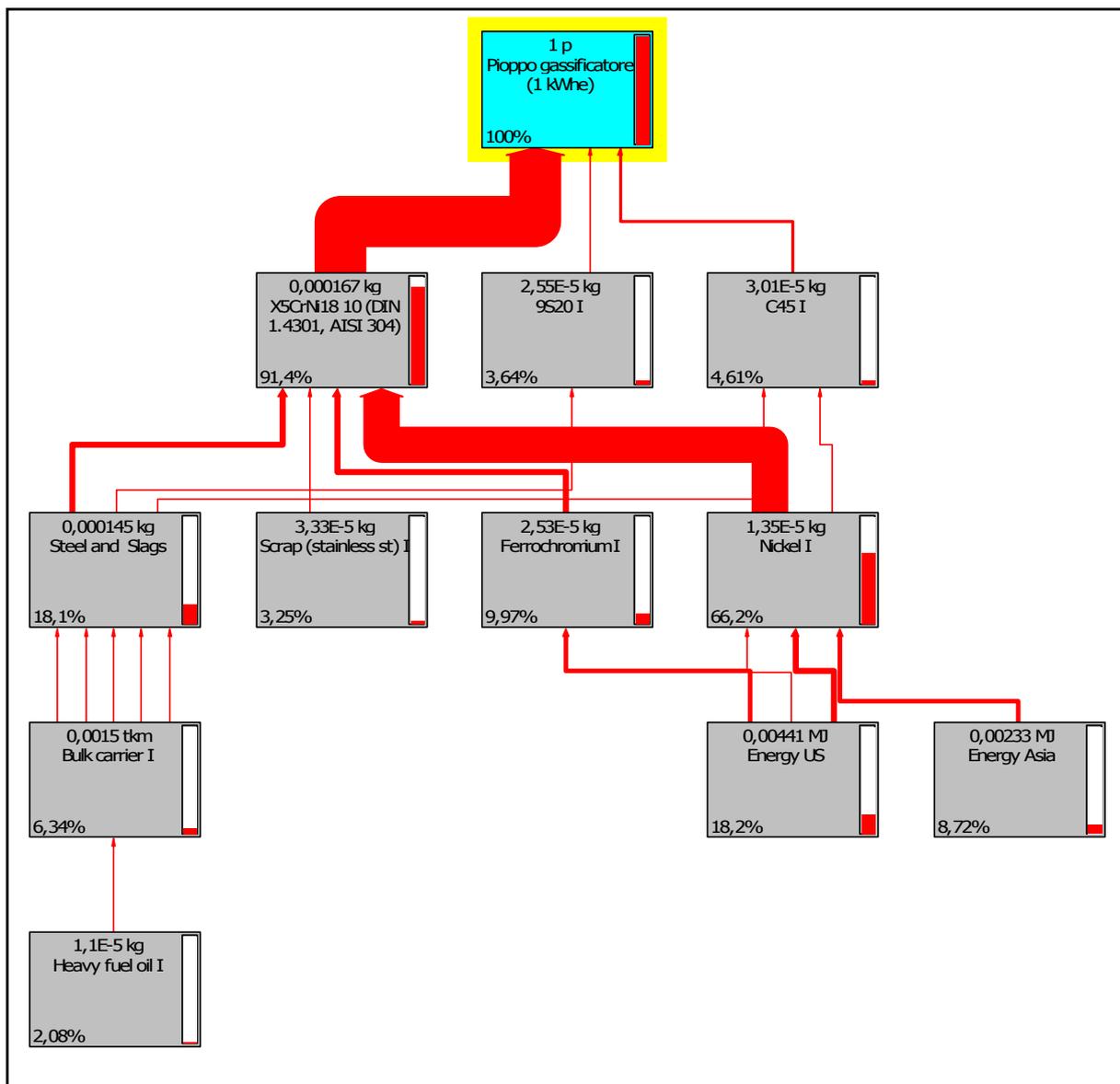
In questo capitolo sono valutati gli impatti dovuti alla costruzione del gassificatore e del suo trasporto dall'azienda produttrice all'impianto produttivo.



**Grafico 5.0.19** Risultati dell'analisi LCA dell'assemblaggio del gassificatore, *Single score P(t)*

L'impatto principale dell'assemblaggio del gassificatore è dato dalla produzione dell'acciaio inox AISI 310 (materiale che comporta il maggior carico ambientale).

Il trasporto ha un impatto che, a confronto dei materiali costruttivi, è trascurabile.

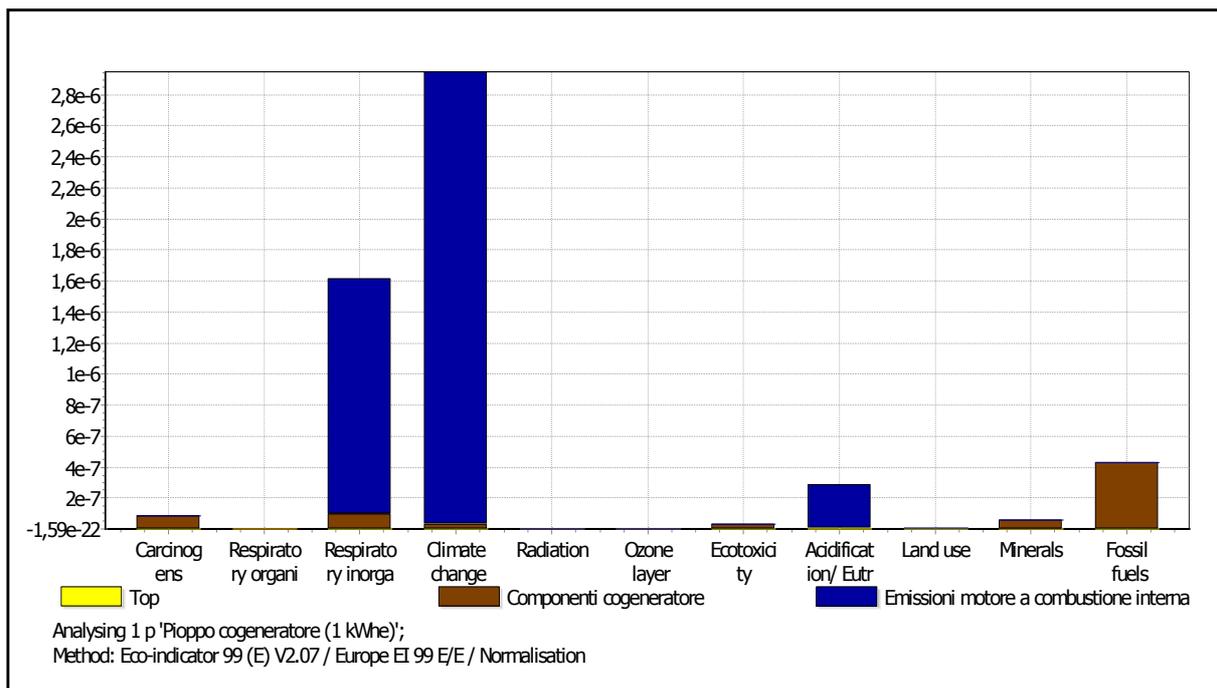


**Diagramma 5.0.5** Diagramma relativo al *Single score* P(t) dell'assemblaggio del gassificatore (*cut-off* 2%)

Per poter vedere nel diagramma il trasporto bisognerebbe calcolare il tutto con un *cut-off* dello 0%, poiché l'impatto da esso generato è pari allo 0,325% del totale.

### 5.3.4 LCIA Assemblaggio impianto cogenerativo

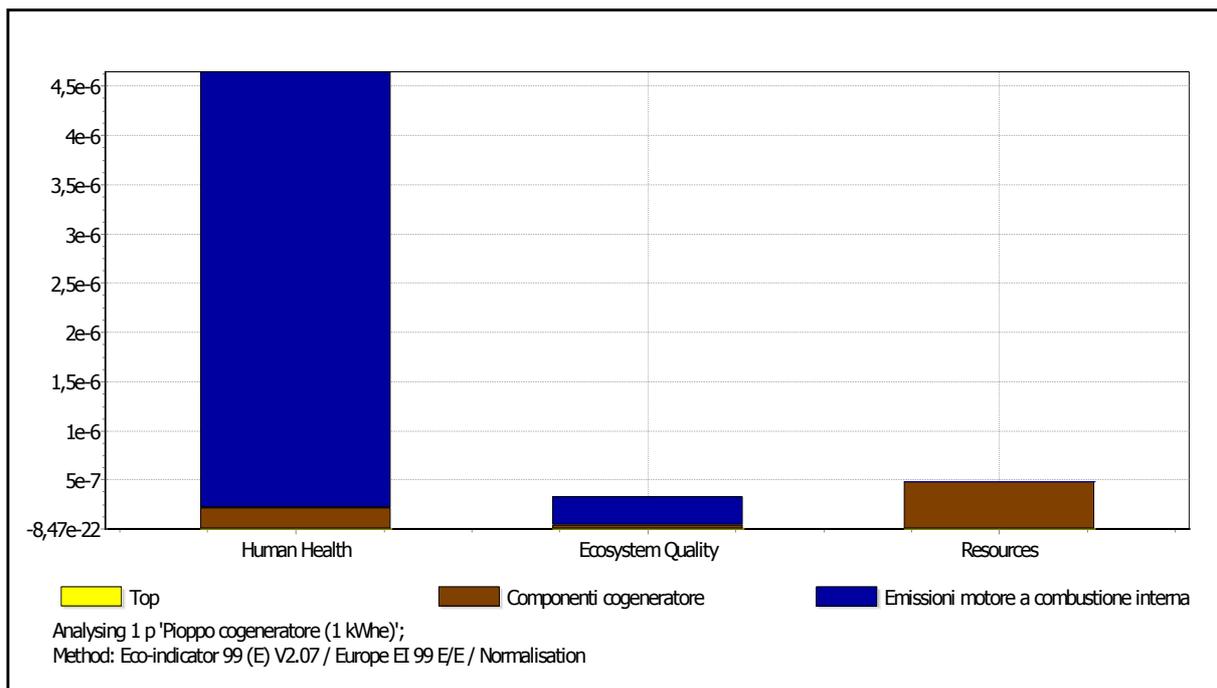
In questo capitolo sono valutati i materiali costruttivi dell'impianto di cogenerazione e le emissioni dovute alla combustione del syngas prodotto dal gassificatore (potenza termica recuperata pari a 0).



**Grafico 5.0.20** Risultati dell'analisi LCA dell'assemblaggio dell'impianto di cogenerazione, *Normalization* (categorie di impatto)

Dal grafico 5.0.20 si evince che le emissioni del motore a combustione interna sono rilevanti per le categorie *Respiratory organic*, *Acidification/Eutrophication* e *Climate change*, mentre i materiali costruttivi impattano, anche se in maniera meno significativa, nelle categorie *Carcinogens*, *Fossil fuels* e *Minerals*.

Il grafico 5.0.21 evidenzia il carico ambientale sulla salute umana causato dalle emissioni del motore e quello sulla categoria *Resources* causato dai componenti costruttivi, anche se con un'impatto normalizzato meno rilevante.



**Grafico 5.0.21** Risultati dell'analisi LCA dell'assemblaggio dell'impianto di cogenerazione, *Normalization* (categorie di danno)

Concludendo si può affermare che il vero impatto dell'impianto di cogenerazione è dovuto alle emissioni, gli impatti dovuti ai materiali che lo costituiscono sono quasi trascurabili (dell'ordine del 10% in *Single score P(t)*).

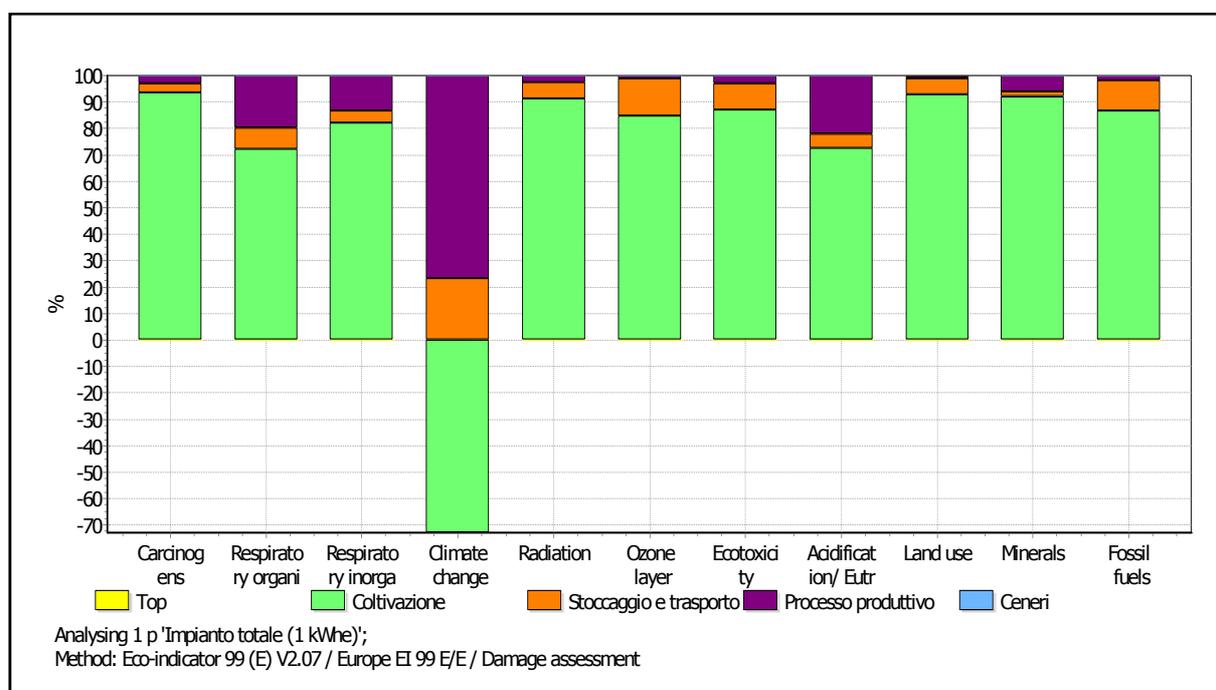
### 5.3.5 LCIA dell'intero sistema

Le quattro macrofasi analizzate nella fase di inventario sono adesso assemblate per creare l'intero sistema che produce energia da gassificazione di biomassa (senza scenario di smaltimento, il quale verrà valutato successivamente).

Nelle tabelle e nei grafici che seguono non è stato considerato il recupero termico, esso sarà valutato successivamente.

Impact category	Unit	Total	Coltivazione	Stoccaggio	Processo produttivo	Ceneri
Carcinogens	DALY	4,39E-08	4,11E-08	1,46E-09	1,33E-09	1,41E-13
Respiratory organics	DALY	2,62E-10	1,89E-10	2,18E-11	5,15E-11	6,47E-14
Respiratory inorganics	DALY	1,99E-07	1,63E-07	9,21E-09	2,64E-08	2,19E-11
Climate change	DALY	1,61E-08	-4,35E-08	1,39E-08	4,57E-08	2,66E-12
Radiation	DALY	5,32E-10	4,86E-10	3,28E-11	1,35E-11	1,11E-14
Ozone layer	DALY	1,92E-11	1,62E-11	2,73E-12	2,17E-13	1,77E-14
Ecotoxicity	PAF*m2yr	5,40E-02	4,69E-02	5,40E-03	1,69E-03	1,02E-06
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	6,77E-03	4,92E-03	3,46E-04	1,51E-03	8,51E-07
Land use	PDF*m2yr	4,53E-03	4,20E-03	2,73E-04	3,98E-05	1,94E-05
Minerals	MJ surplus	1,29E-02	1,18E-02	2,60E-04	7,90E-04	2,88E-08
Fossil fuels	MJ surplus	1,75E-01	1,51E-01	1,99E-02	3,21E-03	1,34E-05

**Tabella 5.0.20** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema senza recupero termico, *Characterisation* (categorie di impatto).



**Grafico 5.0.22** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema senza recupero termico, *Characterisation* (categorie di impatto).

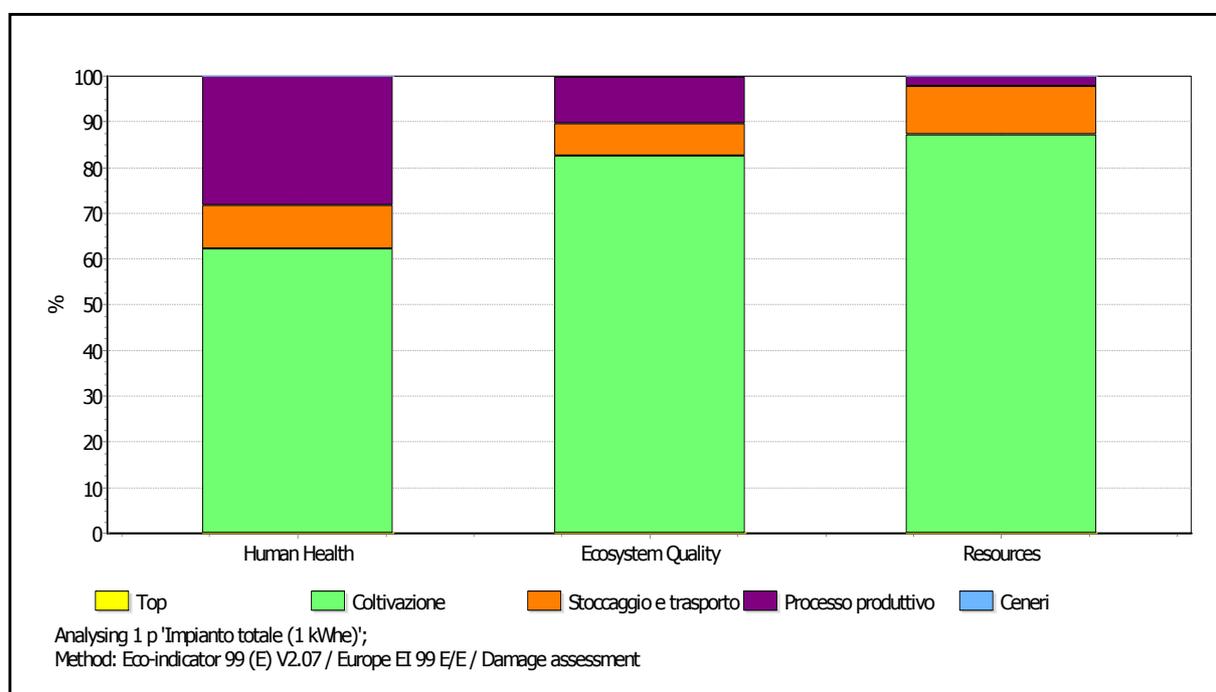
Ciò che si nota dal grafico 5.0.22 è che la macrofase coltivazione è la più impattante, risultato plausibile dato che le lavorazioni che si svolgono sono in numero maggiore rispetto a quelle delle altre macrofasi e che queste sono effettuate per più volte durante i 12 anni di vita ipotizzati del sistema.

Nella categoria *Climate change* c'è una sorta di bilanciamento tra le emissioni del motore e la CO<sub>2</sub> stoccata durante la crescita delle piante. La differenza negativa del 30% è imputabile

all'anidride carbonica sviluppata durante le fasi di trasporto e a quella emessa nelle fasi di costruzione dell'impianto di gassificazione e di cogenerazione.

Damage category	Unit	Total	Coltivazione	Stoccaggio	Processo produttivo	Ceneri
Human Health	DALY	2,59E-07	1,61E-07	2,46E-08	7,35E-08	2,48E-11
Ecosystem Quality	PDF*m2yr	1,67E-02	1,38E-02	1,16E-03	1,71E-03	2,04E-05
Resources	MJ surplus	1,87E-01	1,63E-01	2,01E-02	4,00E-03	1,34E-05

**Tabella 5.0.21** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema senza recupero termico, *Characterisation* (categorie di danno).



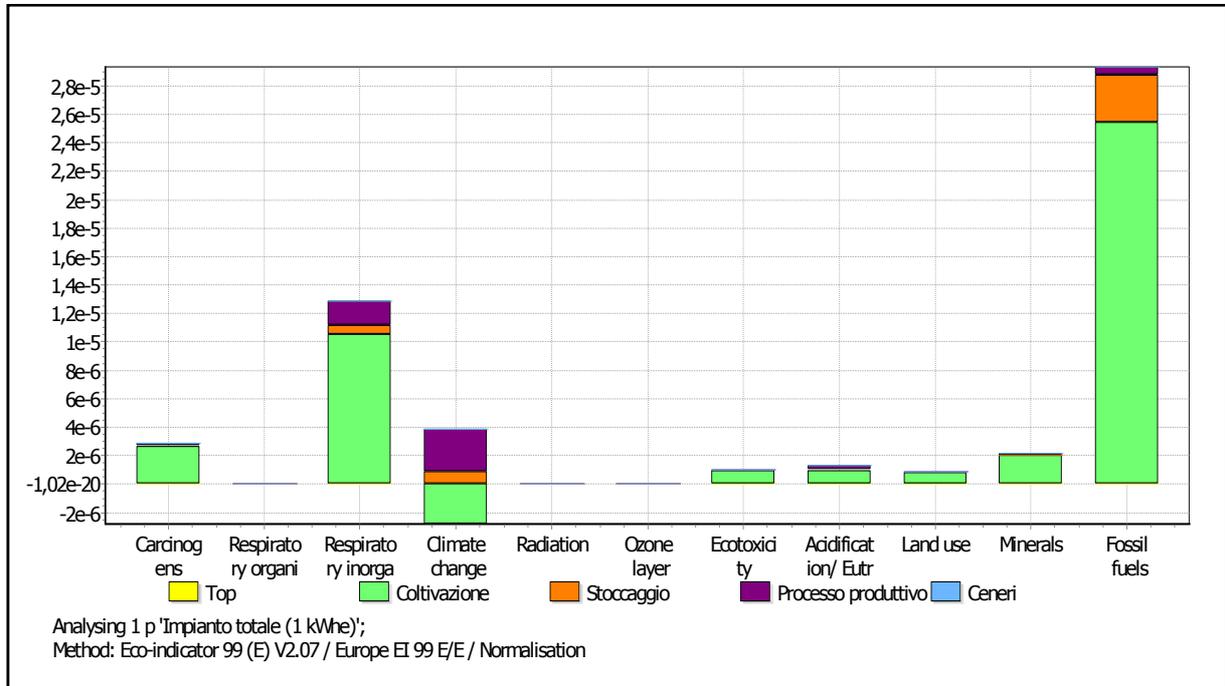
**Grafico 5.0.23** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema senza recupero termico, *Characterisation* (categorie di danno).

Le considerazioni che si possono fare guardando il grafico 5.0.23 sono le stesse fatte precedentemente, si vuole però sottolineare che nella categoria di danno *Resources* è presente prevalentemente la macrofase di coltivazione.

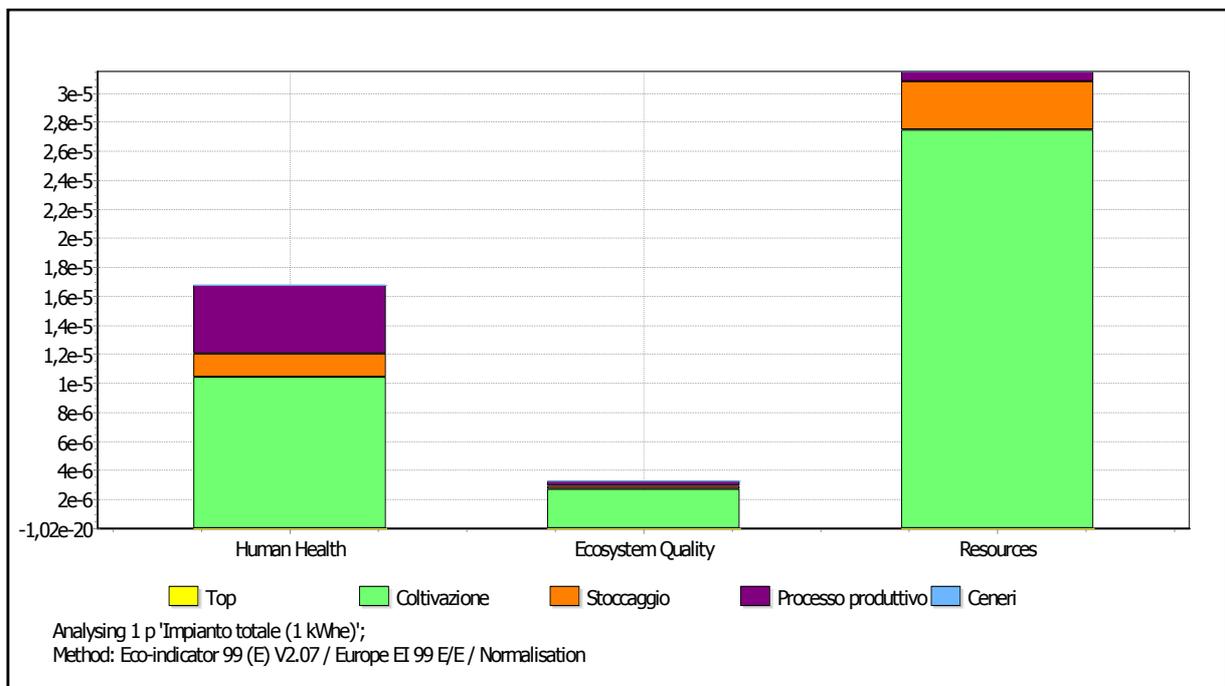
L'impatto dovuto allo smaltimento delle ceneri si può considerare nullo a confronto con le altre macrofasi (0,118% P(t) *Single score*).

I grafici 5.0.24 e 5.0.25 sono riferiti ai dati normalizzati, le categorie di impatto che hanno valori più alti sono *Fossil fuels*, *Climate change*, *Respiratory inorganic* e *Carcinogens*.

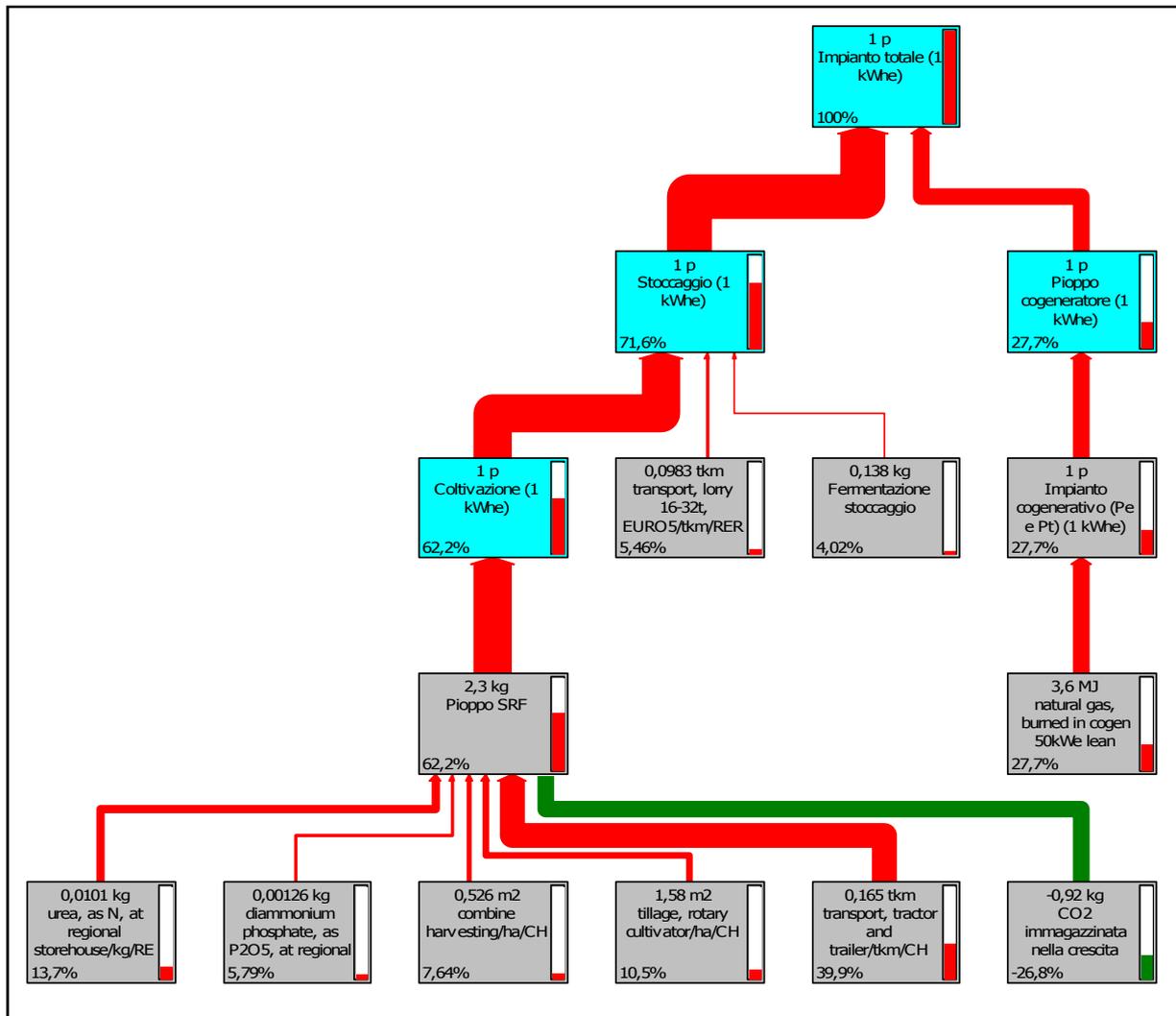
Questo è rispecchiato nelle categorie di danno dove *Resources* e *Human health* hanno valori normalizzati maggiori.



**Grafico 5.0.24** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema senza recupero termico, *Normalization* (categorie di impatto).

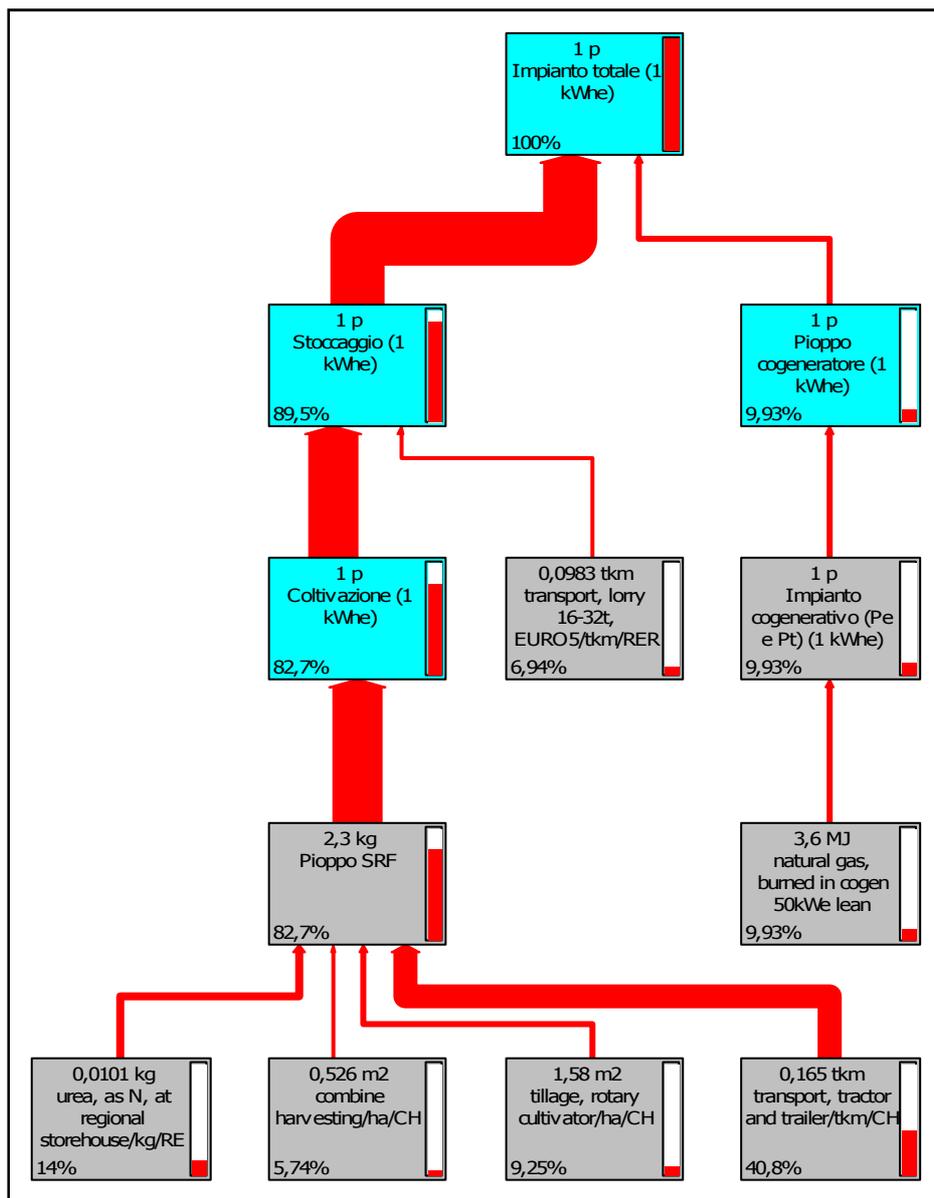


**Grafico 5.0.25** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema senza recupero termico, *Normalization* (categorie di danno).

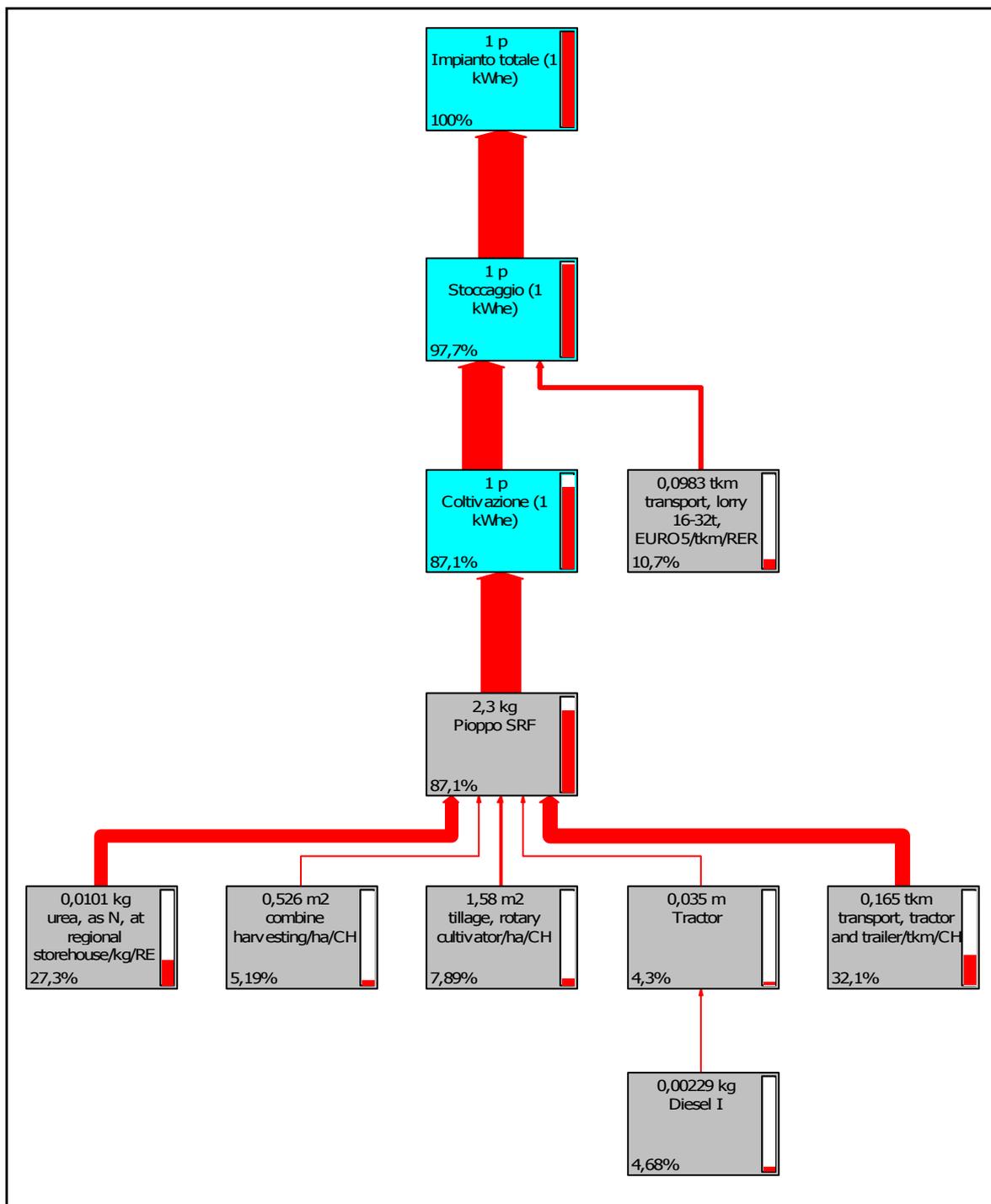


**Diagramma 5.0.6** Diagramma relativo alla categoria di danno *Human Health* dell'intero sistema senza recupero termico, *Normalization (cut-off 4%)*

Nella categoria di danno *Human Health* il 62,2% dell'impatto è dovuto alla macrofase coltivazione, il 9,4% allo stoccaggio e trasporto e il 27,7% alle emissioni dell'impianto cogenerativo. La quota che manca per arrivare al 100% (il 0,7%) è riferita alla costruzione dell'impianto produttivo e allo smaltimento delle ceneri.

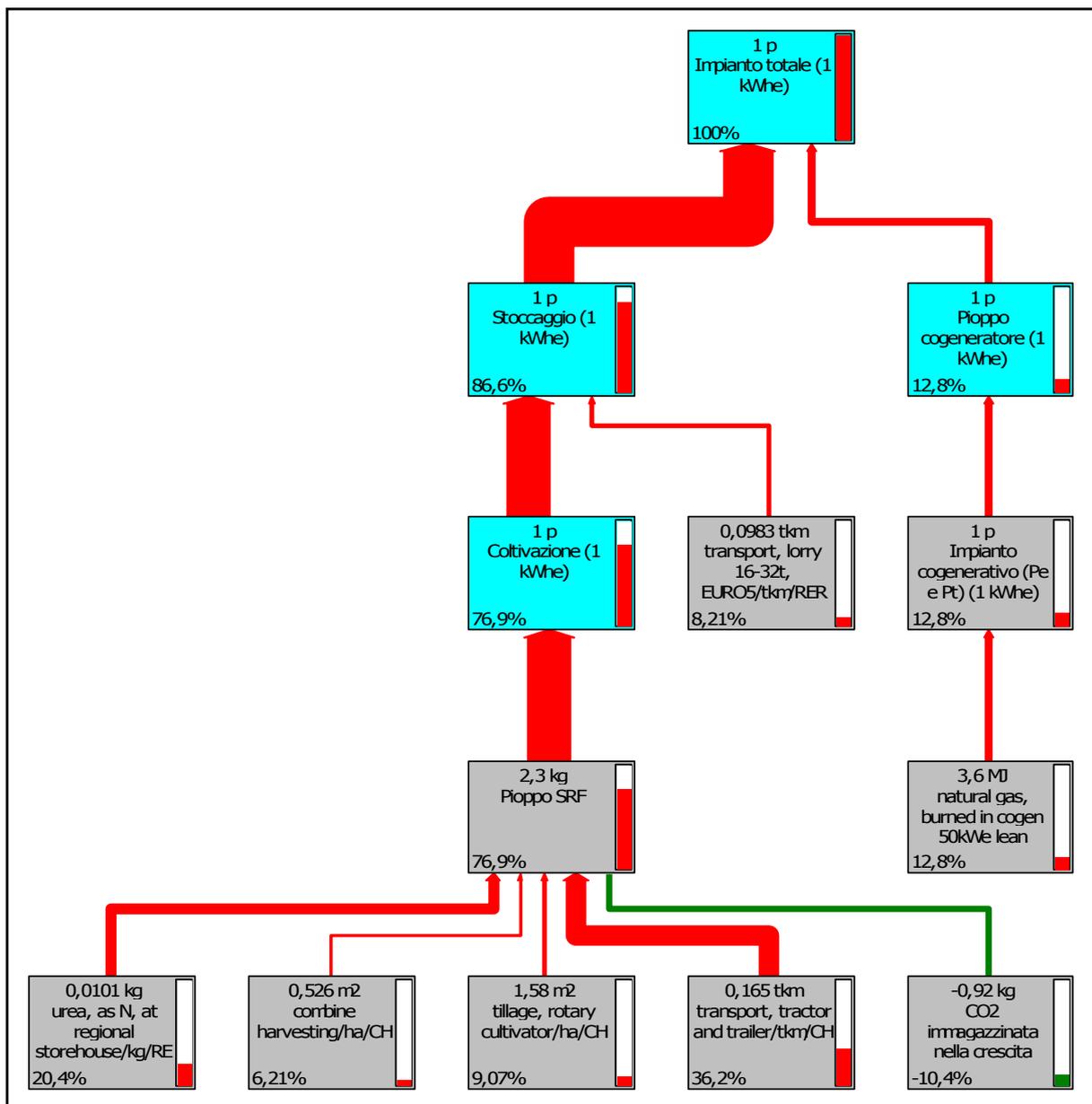


**Diagramma 5.0.7** Diagramma relativo alla categoria di danno *Ecosystem Quality* dell'intero sistema senza recupero termico, *Normalization (cut-off 4%)*



**Diagramma 5.0.8** Diagramma relativo alla categoria di danno *Resources* dell'intero sistema senza recupero termico, *Normalization (cut-off 4%)*

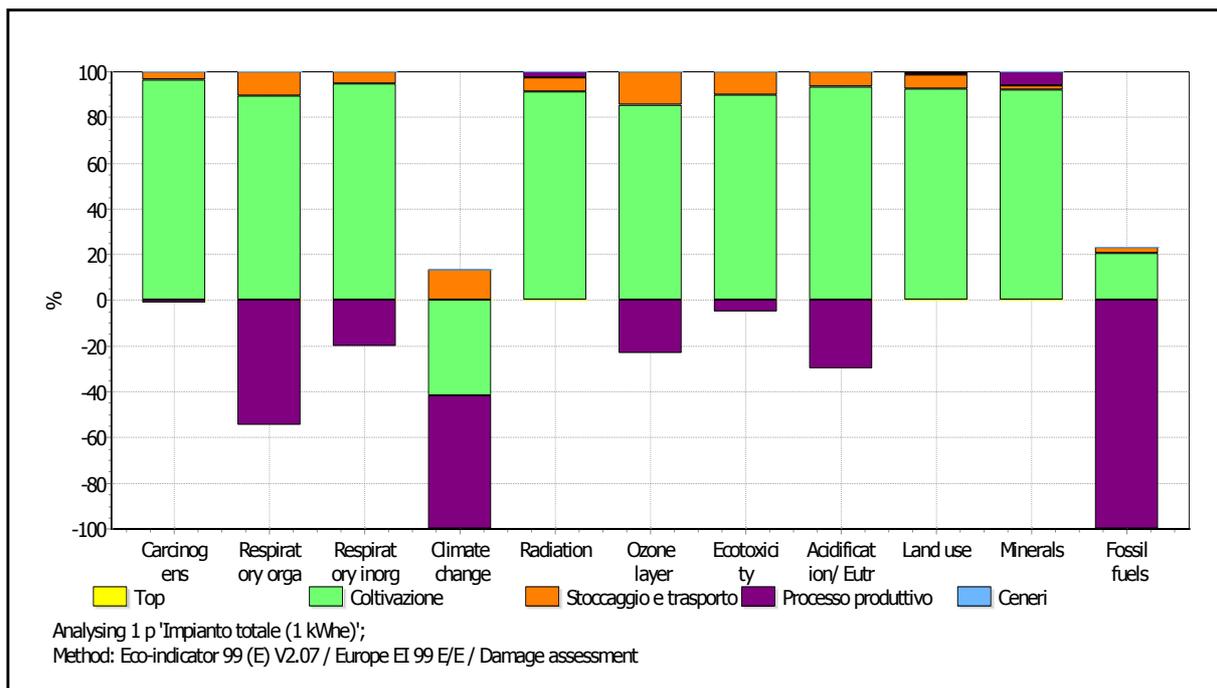
Nella categoria di danno *Resources* l'87,1% dell'impatto è dovuto alla macrofase coltivazione, il 10,7% al trasporto, la quota che rimane è riferita alla costruzione dell'impianto produttivo.



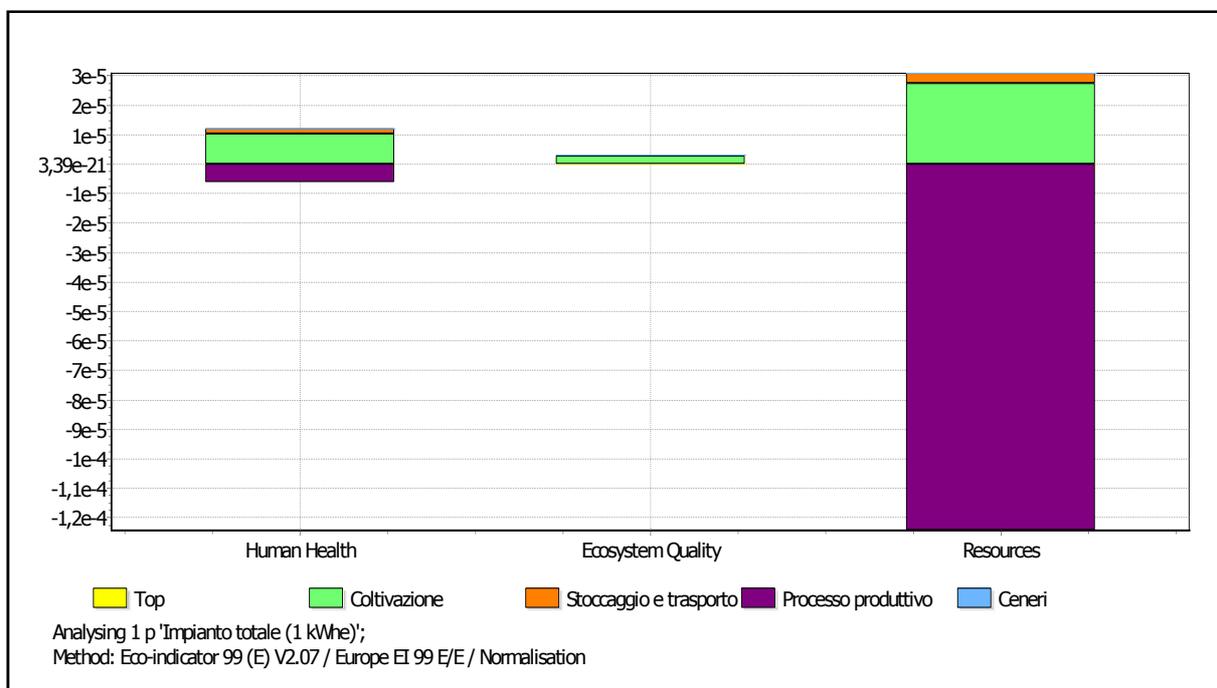
**Diagramma 5.0.9** Diagramma relativo al *Single score* P(t) dell'intero sistema senza recupero termico (cut-off 4%)

Dal diagramma 5.0.9 si può affermare che l'76,9% dell'impatto totale è dato dalla macrofase di coltivazione, l'8,21% dal trasporto del cippato fino all'impianto, il 12,8% dalle emissioni del motore a combustione interna.

I grafici e diagrammi che seguono sono calcolati considerando anche il beneficio dovuto al recupero termico.

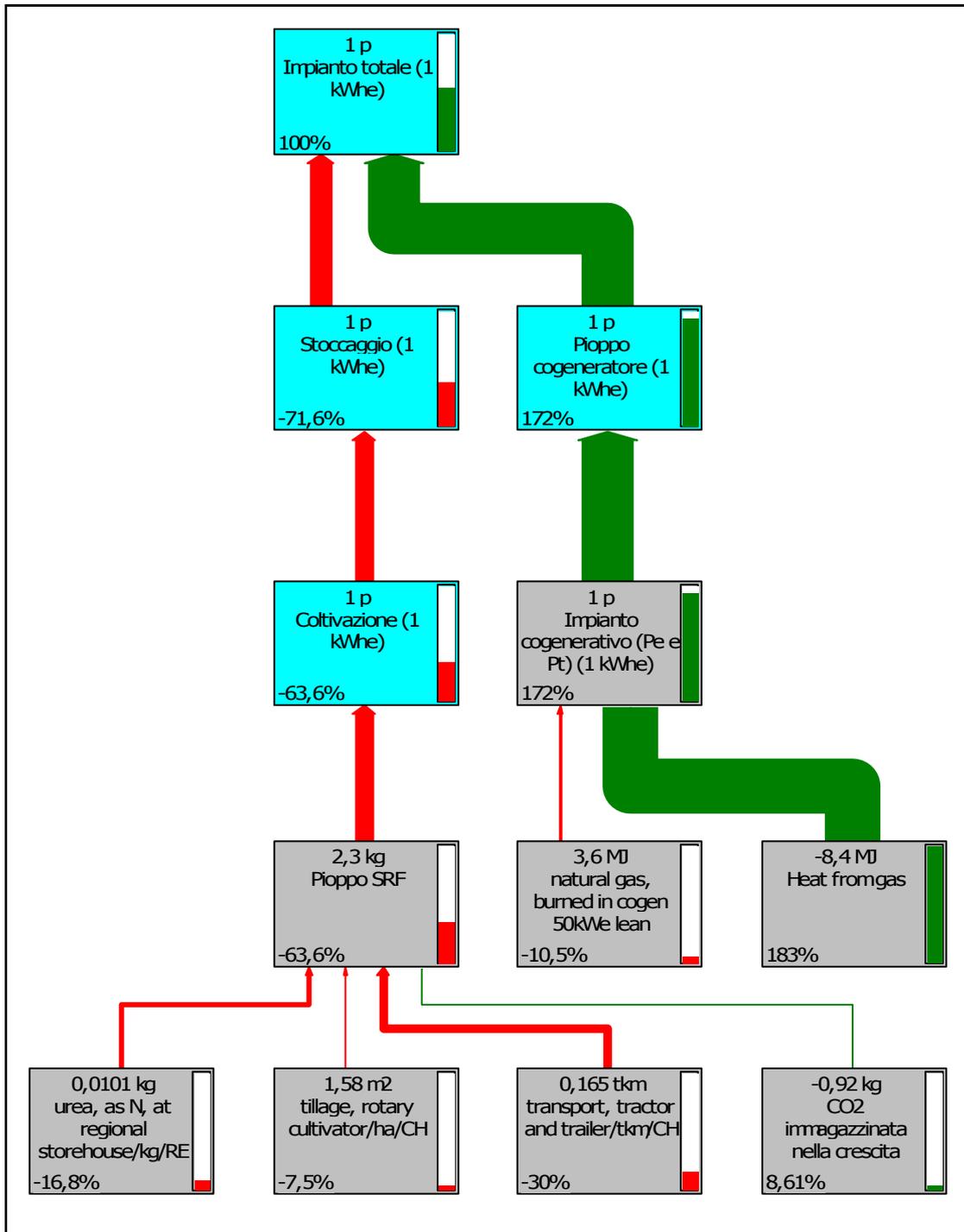


**Grafico 5.0.26** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema con recupero termico totale, *Characterisation* (categorie di impatto).



**Grafico 5.0.27** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema con recupero termico totale, *Normalization* (categorie di danno).

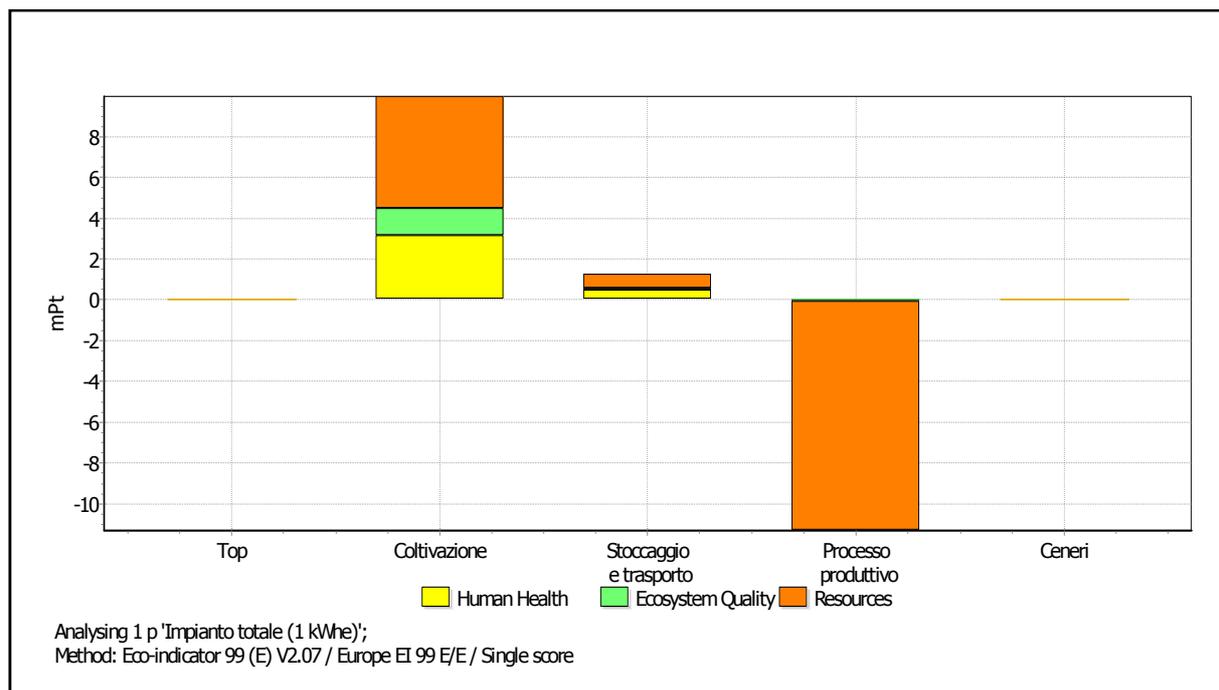
I grafici 5.0.26 e 5.0.27 sottolineano il vantaggio dovuto al recupero termico, questo comporta un minor uso di risorse fossili che, nell'analisi LCA, hanno un peso rilevante per quanto riguarda gli impatti (*Resources*).



**Diagramma 5.0.10** Diagramma relativo al *Single score P(t)* dell'intero sistema con recupero termico totale (*cut-off 4%*)

È evidente che se viene recuperata la totale energia termica a disposizione (caso ideale) il saldo relativo al *Single score* è positivo, si ha quindi un beneficio ambientale nel bilancio dell'intero sistema. L'output evitato implica un impatto evitato, il quale contribuisce favorevolmente nel computo totale con un valore pari al 183%.

Il grafico 5.0.28 si riferisce al recupero termico parziale che comporta l'azzeramento degli impatti grazie all'output evitato relativo all'impianto di cogenerazione.

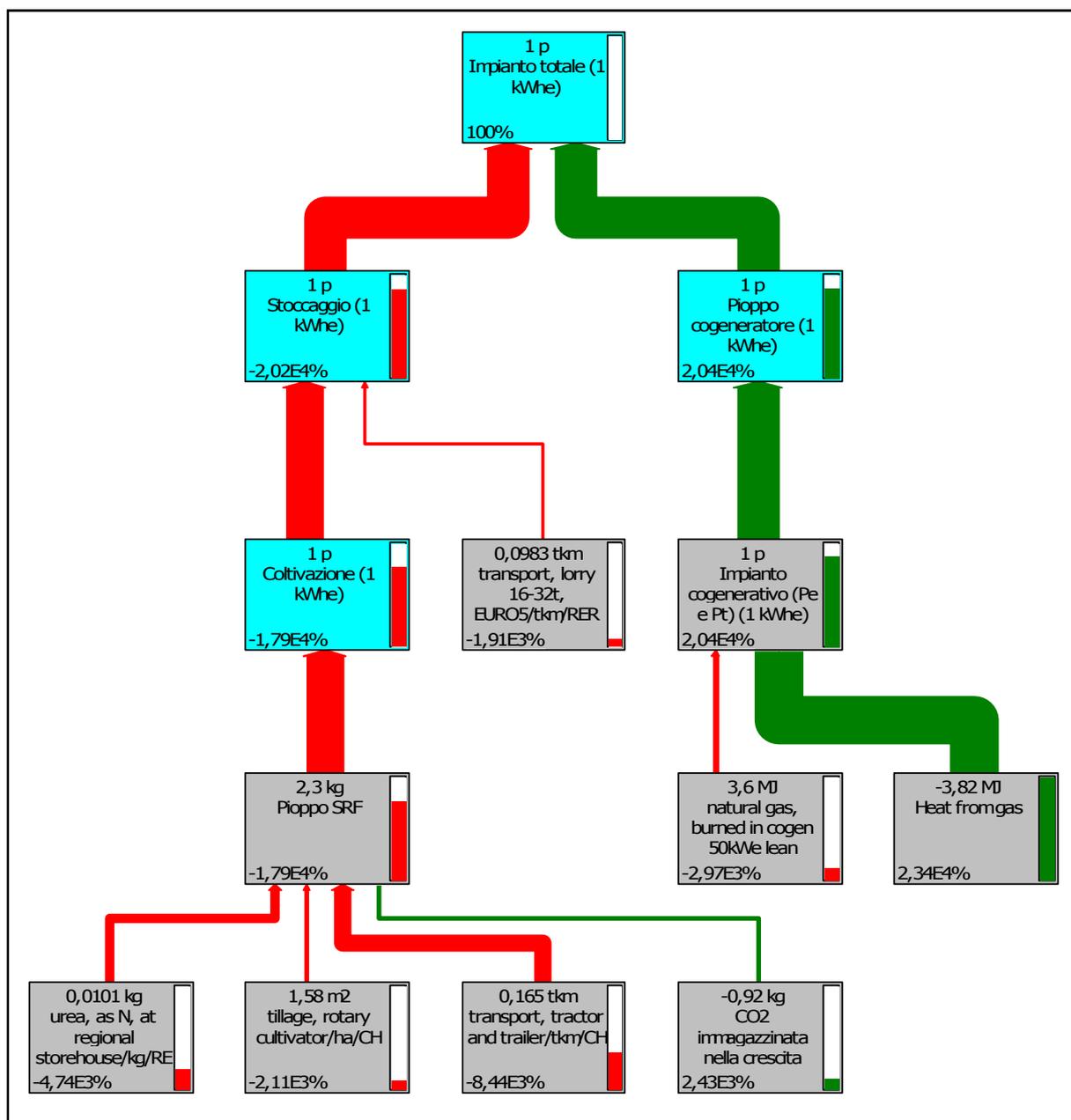


**Grafico 5.0.28** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema con recupero termico limite, *Single score* P(t) (categorie di danno)

In questo caso, invece di recuperare 2,33 kWh<sub>t</sub> per ogni kWh<sub>e</sub> prodotto, si recupera poco meno della metà dell'energia termica a disposizione:

$$\frac{2,33}{2,2} = 1,06 \text{ kWh}_t$$

Tale valore consente di azzerare il punteggio totale degli impatti dell'intero sistema di generazione, tale effetto lo si può vedere nel diagramma 5.0.11.



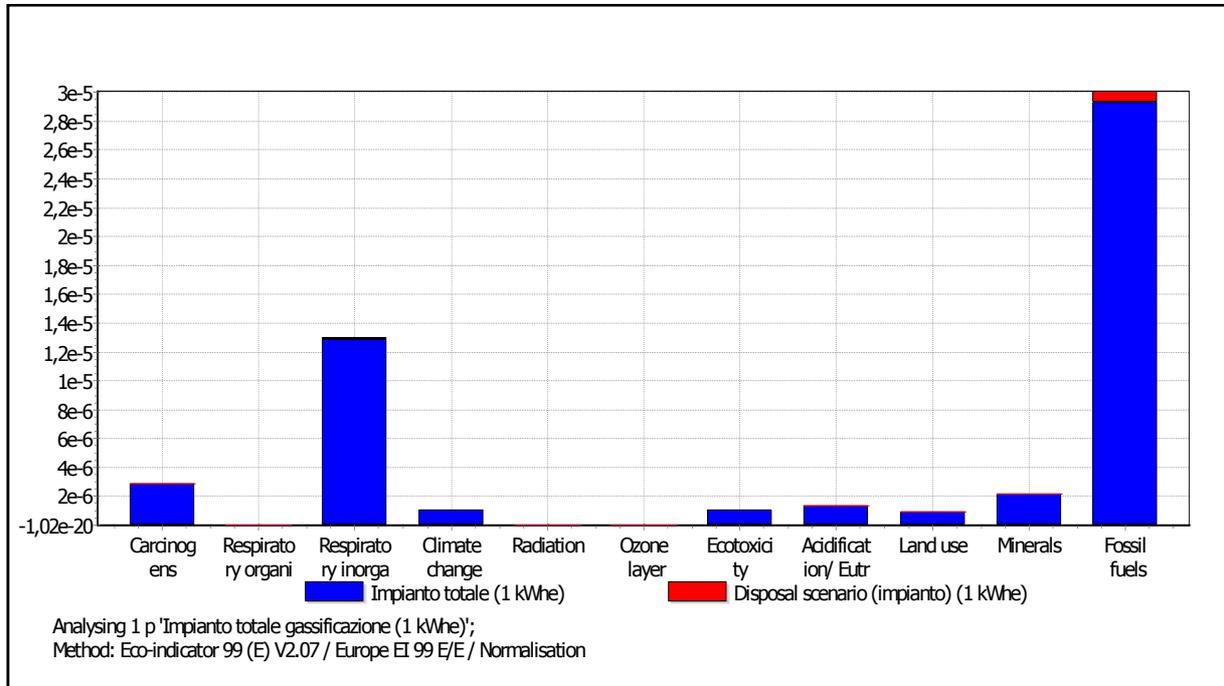
**Diagramma 5.0.11** Diagramma relativo al *Single score* P(t) dell'intero sistema con recupero termico limite (*cut-off* 4%)

### 5.3.6 LCIA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento

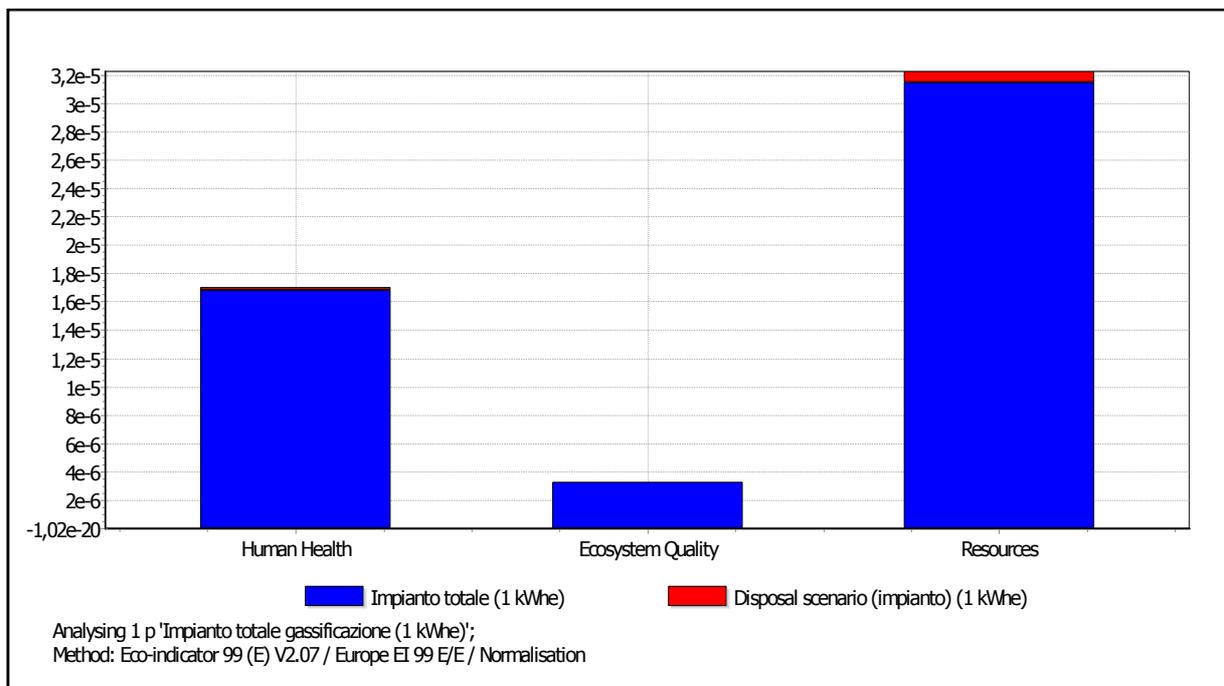
Le considerazioni che si possono fare sono le stesse fatte in precedenza, l'unica puntualizzazione può essere riferita all'impatto che implica lo scenario di smaltimento.

I grafici che seguono sono calcolati sul sistema senza recupero termico, quindi il contributo dello scenario di smaltimento sul computo degli impatti è il maggiore possibile. Se si

considerasse il recupero termico, il contributo alle categorie di impatto sarebbe ancora più piccolo.

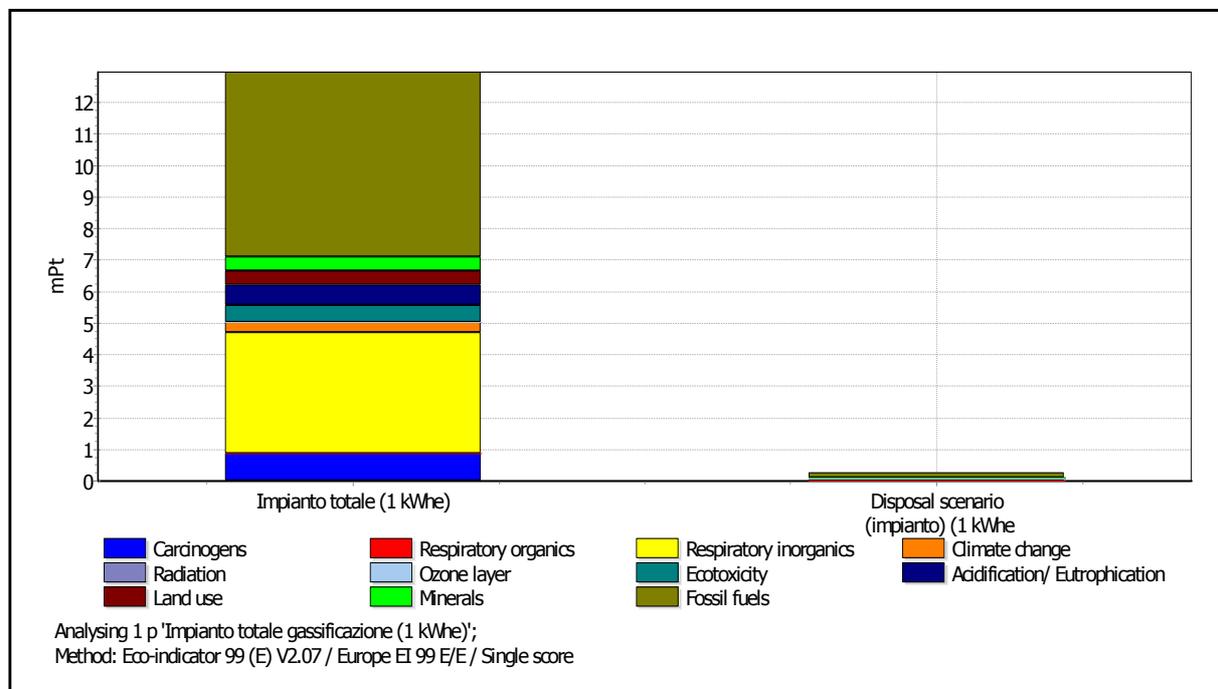


**Grafico 5.0.29** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento, senza recupero termico, *Normalisation* (categorie di impatto)



**Grafico 5.0.30** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento, senza recupero termico, *Normalisation* (categorie di danno)

Il contributo del *Disposal scenario* sulla valutazione del punteggio totale è di circa l'1,89%, valore irrisorio se confrontato con le altre macrofasi, solo lo smaltimento delle ceneri dà un contributo minore (0,116%).



**Grafico 5.0.31** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento, senza recupero termico, *Single score P(t)* (categorie di impatto)

Nell'appendice A è riportato il diagramma dell'intero sistema con scenario di smaltimento annesso senza considerare alcun recupero termico, *Single score P(t)*.

Nell'appendice B è riportato sempre l'intero sistema con scenario di smaltimento annesso considerando il recupero termico totale (ideale), *Single score P(t)*.

### 5.3.7 LCIA con metodo EPD (2008)

Questo metodo è principalmente usato per la preparazioni di dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD<sup>13</sup>) e segue le raccomandazioni della Swedish Environmental Management Council (SEMC). Nello standard EPD si è soliti riferire gli effetti delle seguenti categorie di impatto:

<sup>13</sup> EPD (Environmental Product Declaration) è uno schema di certificazione volontaria, nato in Svezia ma di valenza internazionale, che rientra fra le politiche ambientali comunitarie (rif.to Politica Integrata di Prodotto-IPP).

- composti ad elevati potenziali di riscaldamento;
- gas ad effetto serra;
- gas nocivi allo strato di ozono;
- composti acidificanti;
- gas che comportano creazione di ozono fotochimico;
- composti eutrofizzanti;

La tabella 5.0.22 riporta i risultati del metodo EPD (2008) relativi all'intero sistema con scenario di smaltimento associato.

Impact category	Unit	Total	Impianto totale (1 kWhe)	Disposal scenario (impianto) (1 kWhe)
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	8,06E-02	7,68E-02	3,83E-03
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,01E-08	1,96E-08	5,22E-10
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	2,37E-04	2,33E-04	4,06E-06
Acidification	kg SO2 eq	8,62E-04	8,52E-04	1,05E-05
Eutrophication	kg PO4 <sup>---</sup> eq	2,19E-03	2,18E-03	3,42E-06
Non renewable, fossil	MJ eq	2,56E+00	2,50E+00	6,15E-02

**Tabella 5.0.22** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento, senza recupero termico, *Characterisation*, metodo EPD (2008)

Per produrre 1 kWh<sub>e</sub> tramite impianto di gassificazione di biomassa si emettono in atmosfera 0,00806 kg di CO<sub>2</sub> e si utilizzano 2,56 MJ equivalenti di combustibile fossile. Dato che:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

Allora:

$$2,56 \text{ MJ} = \frac{2,56}{3,6} = 0,711 \text{ kWh}$$

I dati sono mediati sulla produzione di energia elettrica nei 12 anni di vita dell'impianto. Ovviamente se le ore di funzionamento sono minori delle 8000 ipotizzate inizialmente, l'impatto finale risultante sarà maggiore.

Considerando il recupero termico totale si hanno invece i dati della tabella 5.0.23.

Impact category	Unit	Total	Impianto totale (1 kWh <sub>e</sub> )	Disposal scenario (impianto) (1 kWh <sub>e</sub> )
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-4,31E-01	-4,35E-01	3,83E-03
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,63E-08	1,58E-08	5,22E-10
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	9,77E-05	9,36E-05	4,06E-06
Acidification	kg SO2 eq	3,48E-04	3,38E-04	1,05E-05
Eutrophication	kg PO4 <sup>---</sup> eq	2,12E-03	2,12E-03	3,42E-06
Non renewable, fossil	MJ eq	-6,00E+00	-6,06E+00	6,15E-02

**Tabella 5.0.23** Risultati dell'analisi LCA dell'intero sistema associato allo scenario di smaltimento, recupero termico totale, *Characterisation*, metodo EPD (2008)

In questo caso, dato che oltre ad essere prodotto 1 kWh<sub>e</sub> viene anche evitata la produzione da parte di un altro impianto di 2,33 kWh<sub>t</sub>, il saldo nelle categorie “*Global warming (GWP 100)*” e “*Non renewable, fossil*” è negativo.

Si ha quindi, come detto anche nell'analisi degli impatti con il metodo *Ecoindicator*, un beneficio ambientale.

Nella tabella 5.0.24 e nel grafico 5.0.32 sono confrontati gli impatti relativi al sistema con recupero termico nullo, recupero termico totale e recupero termico medio.

Impact category	Unit	Pt = 0	Pt = max	Pt = metà
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	8,06E-02	-4,31E-01	-1,52E-01
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,01E-08	1,63E-08	1,84E-08
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	2,37E-04	9,77E-05	1,74E-04
Acidification	kg SO2 eq	8,62E-04	3,48E-04	6,29E-04
Eutrophication	kg PO4 <sup>---</sup> eq	2,19E-03	2,12E-03	2,16E-03
Non renewable, fossil	MJ eq	2,56E+00	-6,00E+00	-1,33E+00

**Tabella 5.0.24** Confronto dei risultati con diversi recuperi termici, *Characterisation*, metodo EPD (2008)

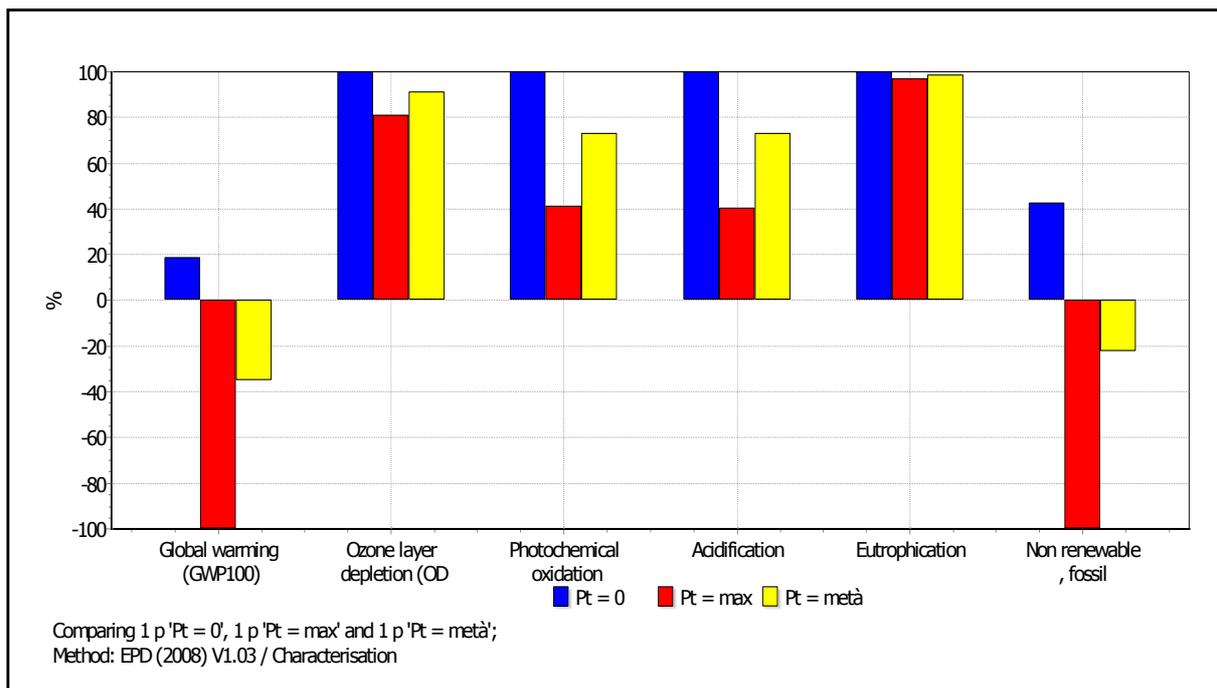


Grafico 5.0.32 Confronto dei risultati con diversi recuperi termici, *Characterisation*, metodo EPD (2008)

### 5.3.8 Confronto con altri impianti di generazione

Ora si confrontano gli impatti relativi all'impianto di gassificazione con quelli di un impianto cogenerativo da 50 kW<sub>e</sub> (combustibile gas naturale) e con una centrale eolica da 150 kW.

I record relativi a questi due impianti sono rispettivamente:

- “**Natural gas, burned in cogen 50kWe lean burn/CH S**” (Processi inclusi: l'approvvigionamento del combustibile, le infrastrutture e le emissioni nell'atmosfera);
- “**Electricity, at wind power plant Grenchenberg 150kW/CH S**” (Include le infrastrutture e il funzionamento della centrale con il necessario ricambio di olio, fattore di capacità del 10,5%).

Ovviamente gli impatti della centrale eolica, essendo riferiti ad una potenza di 150 kW, saranno minori rispetto a quelli di una centrale da 50 kW.

Per quanto concerne l'impianto di gassificazione non si considera lo scenario di smaltimento e il recupero termico è nullo.

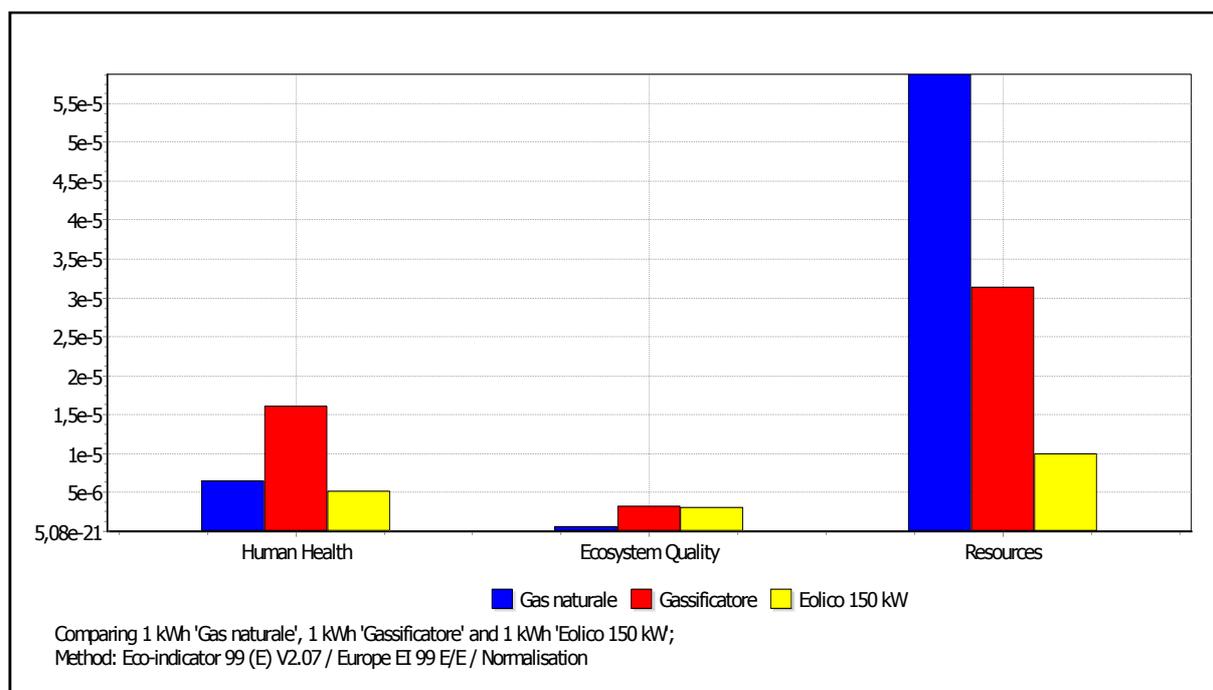
L'unità funzionale è sempre il kWh<sub>e</sub>.

Impact category	Unit	Gas naturale	Gassificatore	Eolico 150 kW
Carcinogens	DALY	2,80E-09	4,39E-08	3,60E-08
Respiratory organics	DALY	1,83E-10	2,62E-10	2,50E-11
Respiratory inorganics	DALY	4,13E-08	1,98E-07	3,84E-08
Climate change	DALY	5,62E-08	5,55E-09	6,48E-09
Radiation	DALY	2,98E-11	5,32E-10	1,07E-10
Ozone layer	DALY	3,63E-11	1,91E-11	1,91E-12
Ecotoxicity	PAF*m2yr	3,75E-03	5,40E-02	1,02E-01
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	2,09E-03	6,75E-03	5,36E-04
Land use	PDF*m2yr	7,85E-04	4,54E-03	4,86E-03
Minerals	MJ surplus	7,06E-04	1,26E-02	2,93E-02
Fossil fuels	MJ surplus	3,49E-01	1,74E-01	3,02E-02

**Tabella 5.0.25** Confronto degli impatti con tre impianti di generazione, *Characterisation*, (categorie di impatto)

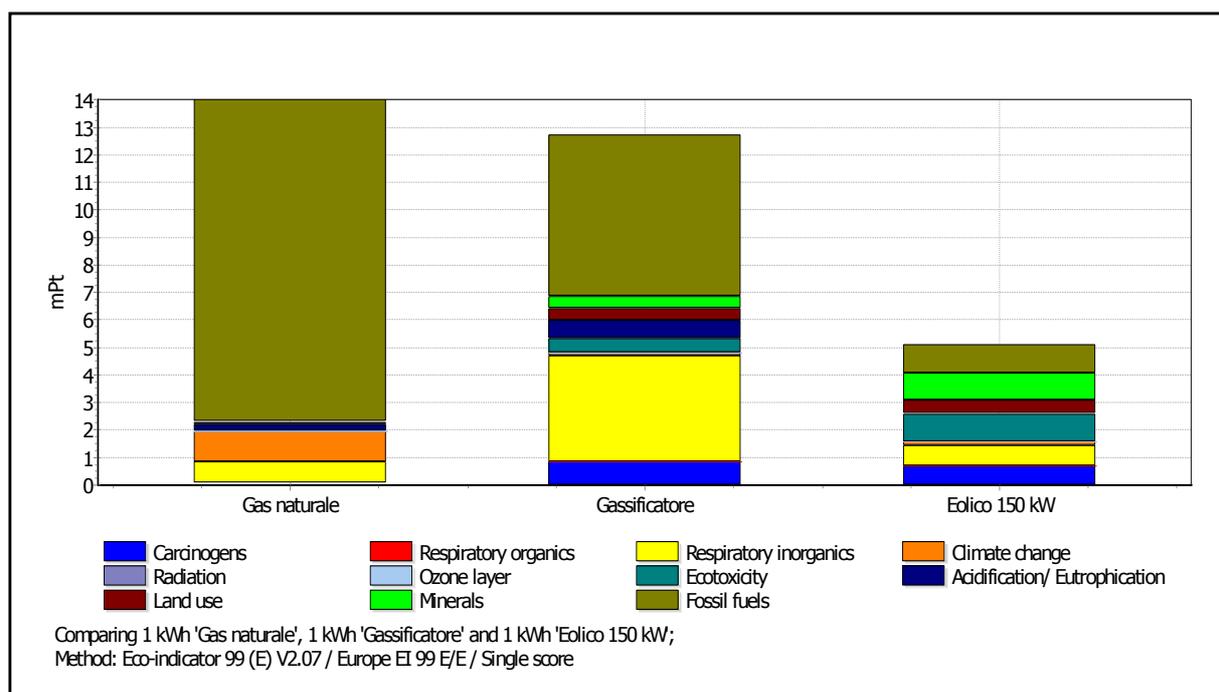
Damage category	Unit	Gas naturale	Gassificatore	Eolico 150 kW
Human Health	DALY	1,01E-07	2,48E-07	8,10E-08
Ecosystem Quality	PDF*m2yr	3,25E-03	1,67E-02	1,56E-02
Resources	MJ surplus	3,49E-01	1,87E-01	5,95E-02

**Tabella 5.0.26** Confronto degli impatti con tre impianti di generazione, *Characterisation*, (categorie di danno)



**Grafico 5.0.33** Confronto degli impatti con tre impianti di generazione, *Normalization*, (categorie di danno)

Dal grafico 5.0.33 si può notare che l'impianto di gassificazione ha un valore di impatto elevato nella categoria di danno *Human health* rispetto alle altre tecnologie. Questo è da imputare soprattutto alla macrofase di coltivazione, nella quale, come visto nei capitoli precedenti, l'uso di mezzi agricoli e di fertilizzanti ha un impatto notevole. Impatto che poi si ripercuote anche nella categoria *Ecosystem Quality*.



**Grafico 5.0.34** Confronto degli impatti con tre impianti di generazione, *Single score P(t)*

Se si considera il recupero termico la categoria *Resources* diminuisce fino a diventare negativa, portando beneficio all'intero sistema.

Impact category	Unit	Gas naturale	Gassificatore	Eolico 150 kW
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	2,70E-01	8,06E-02	3,10E-02
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6,20E-08	2,01E-08	1,45E-09
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,52E-04	2,37E-04	2,60E-05
Acidification	kg SO2 eq	2,83E-04	8,62E-04	1,32E-04
Eutrophication	kg PO4--- eq	5,72E-05	2,19E-03	8,03E-05
Non renewable, fossil	MJ eq	4,38E+00	2,56E+00	4,71E-01

**Tabella 5.0.27** Confronto degli impatti con tre impianti di generazione, *Characterisation*, metodo EPD (2008)

Se si confrontano i dati tra l'impianto di cogenerazione funzionante a gas naturale e quello a syngas si ottengono i seguenti risultati:

Impact category	Unit	Gas naturale	Gassificatore	Rapporto (Gassificatore/G as naturale)
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	2,70E-01	8,06E-02	0,30
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6,20E-08	2,01E-08	0,32
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,52E-04	2,37E-04	1,56
Acidification	kg SO2 eq	2,83E-04	8,62E-04	3,04
Eutrophication	kg PO4--- eq	5,72E-05	2,19E-03	38,21
Non renewable, fossil	MJ eq	4,38E+00	2,56E+00	0,59

**Tabella 5.0.28** Confronto degli impatti, *Characterisation*, metodo EPD (2008)

Nella categoria *Global warming* e *Ozone layer depletion* la CO<sub>2</sub> e il CFC-11 equivalenti emessi dall'impianto di gassificazione di biomassa per ogni kWh<sub>e</sub> sono circa il 30% rispetto al caso di impianto a gas naturale.

L'uso di energia fossile è invece il 59% rispetto all'impianto a gas naturale, questo è dovuto soprattutto al carburante dei mezzi agricoli, alla fase di trasporto del cippato e alla produzione dei concimi utili alla coltivazione.

Le categorie *Photochemical oxidation*, *Acidification* e *Eutrophication* sono meno impattanti nel caso di impianto a gas naturale.

Le categorie che preoccupano maggiormente sono quelle relative alla qualità dell'ecosistema, dove l'eutrofizzazione ha un valore di quasi 40 volte maggiore rispetto all'impianto a metano. La causa di tali impatti è dovuta all'uso di concimi e pesticidi che alterano l'acidità e il livello nutritivo del terreno coltivato. L'effetto negativo sarebbe minore se oltre ad utilizzare biomassa derivante da SRF si utilizzassero residui forestali.

### 5.3.9 Confronto delle emissioni di CO<sub>2</sub> con la produzione elettrica italiana

La domanda di elettricità sul territorio nazionale è prevalentemente soddisfatta attraverso la produzione termoelettrica (70,8% nel 2009). La produzione termoelettrica è passata da 178.590 GWh del 1990 a 226.638 GWh del 2009, con un incremento del 26,9%.

I combustibili fossili costituiscono pertanto la principale fonte energetica per la generazione elettrica nazionale.

Fino alla prima metà degli anni '90 i prodotti petroliferi, ed in particolare l'olio combustibile, rivestivano un ruolo prevalente nella generazione elettrica contribuendo alla produzione di circa il 50% dell'energia elettrica di origine termica. Dalla seconda metà degli anni '90, in seguito all'effetto combinato di politiche ambientali mirate alla riduzione delle emissioni inquinanti, l'aumento del prezzo del petrolio e la maggiore efficienza dei cicli combinati rispetto alle caldaie tradizionali, si assiste ad una progressiva diminuzione dell'impiego di prodotti petroliferi nel settore termoelettrico e ad un contestuale incremento della quota di gas naturale (grafico 5.0.35).

Nel mix di combustibili fossili un ruolo non irrilevante è ricoperto dal carbone che contribuisce alla produzione di circa il 12% dell'elettricità di origine termoelettrica.

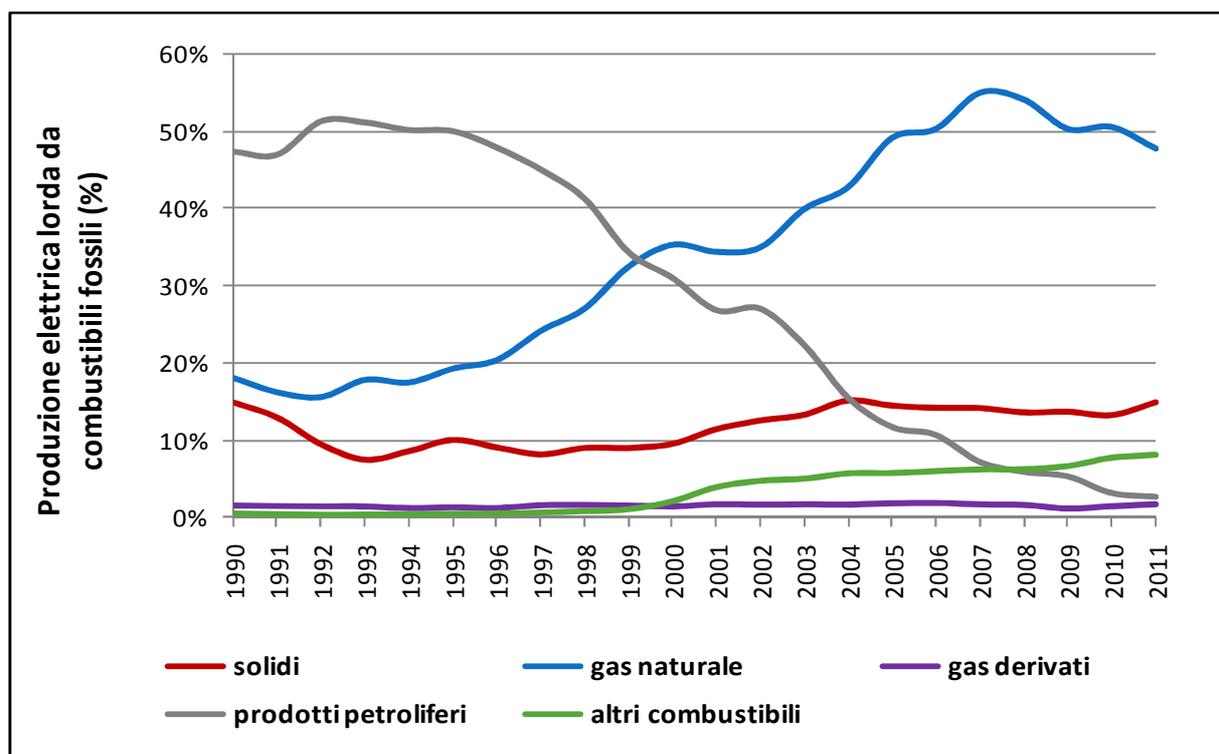
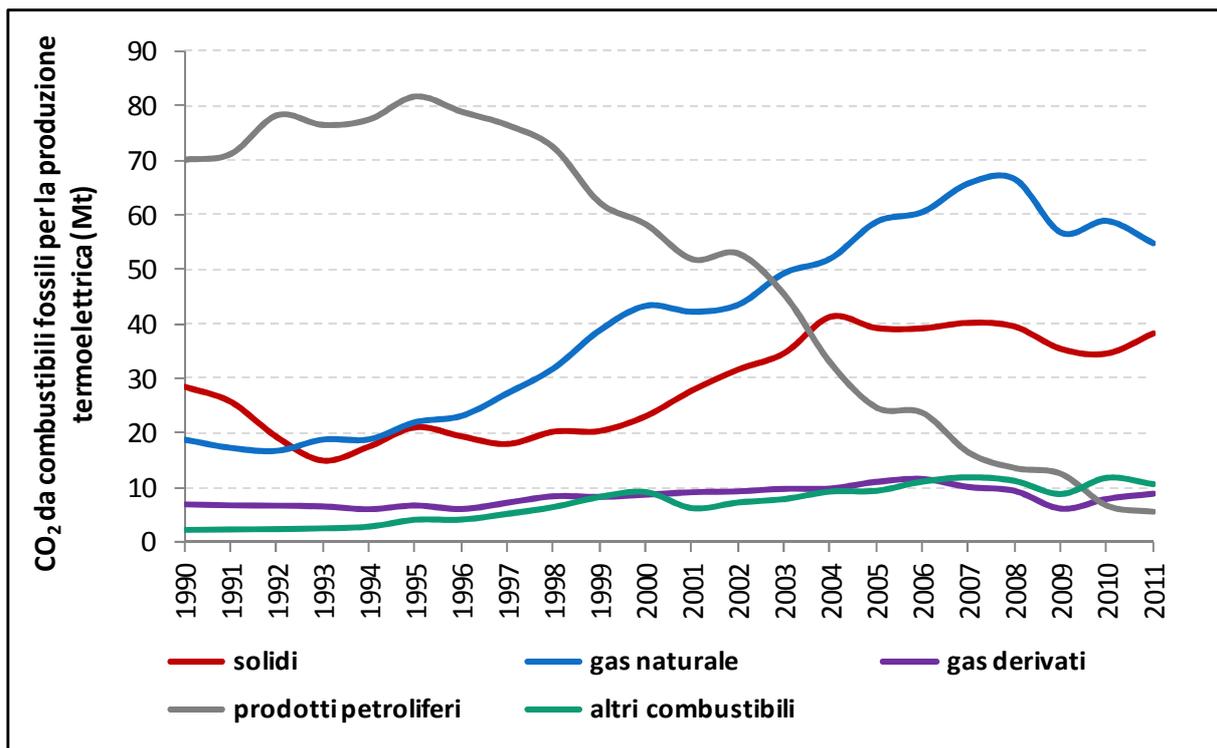


Grafico 5.0.35 Percentuale della produzione termoelettrica lorda per combustibile

Nel grafico 5.0.36, strettamente legato al grafico precedente, viene rappresentato l'andamento delle emissioni di CO2 originate dalla combustione delle diverse fonti energetiche di origine fossile per la produzione elettrica.



**Grafico 5.0.36** Andamento delle emissioni da produzione termoelettrica per combustibile

La quantità di anidride carbonica emessa per la produzione elettrica a livello nazionale dipende strettamente dal mix di combustibili utilizzato nel settore termoelettrico ed è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche degli stessi combustibili (contenuto di carbonio, potere calorifico inferiore, ecc.).

Le emissioni di anidride carbonica per unità di energia elettrica lorda prodotta dal parco termoelettrico italiano mostrano un andamento in continua diminuzione dal 1990.

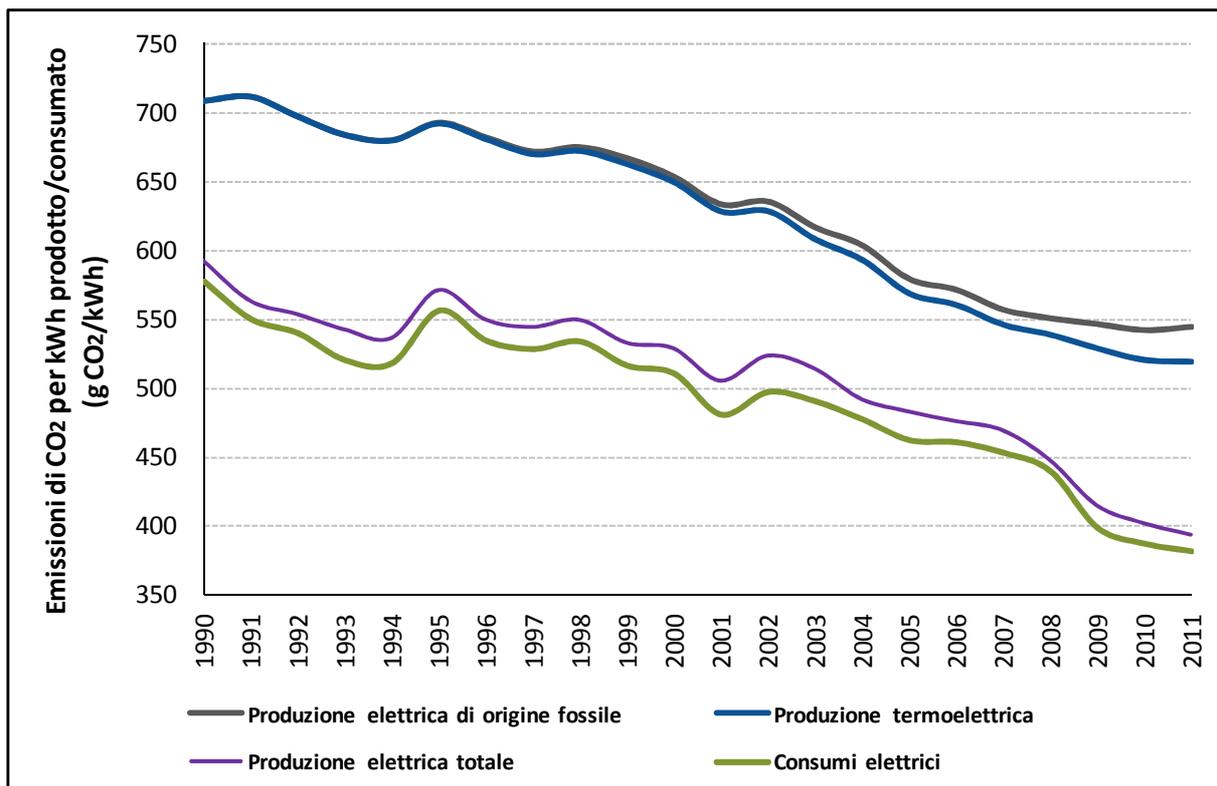


Grafico 5.0.37 Andamento del fattore di emissione di CO<sub>2</sub> (g) per kWh elettrico prodotto (lordo) e consumato

COMBUSTIBILI	[g CO <sub>2</sub> / kWh lordo]					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Totale combustibili fossili	571,8	557,3	551,2	546,9	542,5	544,9
Totale combustibili [1]	560,2	545,8	538,6	528,7	520,3	519,0
Totale termoelettrico (+Vapore endogeno e altre fonti di calore) [2]	546,5	532,6	525,6	515,1	506,7	504,7
Totale E.E. (+altre FER) [3]	475,5	468,8	447,3	414,4	401,3	393,1

- [1] Nel totale da combustibili è considerata la combustione delle biomasse che formalmente rappresentano delle fonti rinnovabili con bilancio emissivo pari a zero.
- [2] Nel totale termoelettrico è considerata l'energia geotermica (vapore) che rappresenta una fonte rinnovabile con bilancio emissivo pari a zero.
- [3] Si considera il contributo della fonte idroelettrica, eolica e fotovoltaica.

Tabella 5.0.29 emissioni di CO<sub>2</sub> (g) per kWh elettrico prodotto (lordo) e consumato.

I dati della tabella 5.0.29, essendo riferiti al kWh<sub>e</sub>, sono ora confrontati con i risultati dell'analisi LCA.

Nella categoria di impatto *Global warming* (GWP 100) del metodo EDP (2008), riferendosi al caso con recupero termico nullo, il risultato è pari a  $8,06 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{kWh}_e}$ .

Se confrontato con la situazione italiana, considerando oltre al totale termoelettrico anche il contributo delle fonti rinnovabili, è evidente il minor impatto che la gassificazione di biomassa implica nella produzione di energia.

Più precisamente:

$$\frac{0,393 \frac{\text{kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{kWh}_e}}{0,0806 \frac{\text{kg CO}_2 \text{ eq}}{\text{kWh}_e}} = 4,88$$

La CO<sub>2</sub> emessa in un impianto di gassificazione di biomassa è 4,88 volte minore rispetto a quella emessa mediamente in Italia per produrre un kWh<sub>e</sub>.

## 6. CONCLUSIONI

---

Lo studio svolto nei capitoli precedenti è nato dalla necessità di valutare il carico ambientale della produzione di energia da gassificazione di biomassa.

Le ipotesi fatte durante la trattazione sono state il tipo di coltura, l'uso dell'irrigazione, la distanza dall'imposto all'impianto e l'energia termica recuperata.

Per quanto riguarda il tipo di coltura analizzato è stato scelto il pioppo per il fatto che in Italia sono la principale coltura lignocellulosica coltivata a scopo energetico. I macchinari utilizzati per le lavorazioni sono anch'essi ipotizzati dato che non si fa riferimento ad alcun impianto esistente ma solo alle lavorazioni agricole necessarie allo sviluppo del pioppo a ceduzione biennale (12 anni).

Basandoci solamente sulla macrofase coltivazione quello che si evince è che il danno maggiore è dato, durante la raccolta, dal trasporto del cippato fino all'imposto con un impatto del 47,1% (punteggio totale, P(t)). Successivamente la produzione dei fertilizzanti (Urea e del concime ternario) con il 32,5%, l'irrigazione ha invece un impatto del 2,65% sul totale.

Quest'ultimo risultato sottolinea l'apporto positivo dell'irrigazione alla coltura visto che, con un impatto irrisorio, si ha una maggiore resa della piantagione (15 t<sub>ss</sub>/ha nel caso senza irrigazione, 17,5 t<sub>ss</sub>/ha nel caso con irrigazione). Quindi, anche in termini puramente economici, la spesa delle pompe e dell'acqua per consentire l'irrigazione può essere giustificata.

Le lavorazioni agricole che impattano maggiormente sono la pulizia dell'interfila tramite fresatrice (11,8%) e la raccolta tramite falcia-trincia-caricatrice (8,08%).

Si deve però puntualizzare che l'impatto del trasporto del cippato all'imposto ha un'incertezza elevata, poiché è difficile valutare, durante la raccolta, il percorso reale fatto dalla trattrice e il carico che varia gradualmente da vuoto a pieno.

Oltre agli impatti va precisato anche un prodotto evitato: la CO<sub>2</sub> immagazzinata durante la crescita degli alberi di pioppo. Questa porta un beneficio all'intera macrofase con il 13,5% di impatto evitato.

Per quanto riguarda lo stoccaggio si deve sottolineare la perdita di sostanza secca dovuta a reazioni chimiche e biochimiche che provocano la decomposizione della materia organica. L'ipotesi fatta in questa macrofase è che il cippato sia coperto da un telo geotessile, soluzione migliore nell'ipotesi di pezzatura fine.

La perdita di sostanza secca è del 15% e l'umidità alla fine dello stoccaggio si attesta al 30%, il potere calorifico inferiore della biomassa essiccata è di 17 MJ/kg<sub>ss</sub>.

Sono state inoltre valutate tre situazioni logistiche differenti: caso A con distanza dall'imposto all'impianto di 10 km (il mezzo utilizzato è la stessa trattoria con rimorchio della raccolta), caso B e caso C rispettivamente 50 e 100 km di distanza (il mezzo utilizzato è un autocarro).

L'analisi degli impatti dimostra che il caso A e il caso B, anche se riferiti a distanze diverse, hanno impatti pressoché uguali.

La risposta è da ricercare nel tipo di mezzo utilizzato, poiché il trattore, avendo un motore meno prestante rispetto all'autocarro, comporta un carico ambientale maggiore nelle categorie di impatto quali *Respiratory inorganic* e *Carcinogens*, e, essendo la distanza minore, anche minor uso di combustibile fossile.

Nonostante queste puntualizzazioni, se si considera l'intero sistema con scenario di smaltimento, la fase di trasporto (caso B) ha un impatto del 9,88% (punteggio totale, P(t)), invece il caso C porta ad un impatto pari al 16,5% del totale.

La distanza dell'impianto dalla coltura è quindi discriminante sia in termini ambientali che in termini economici, sono da preferire distanze inferiori ai 50 km.

Il carico ambientale che comporta la costruzione dell'impianto di gassificazione è dello 0,56%, valore trascurabile se confrontato al trasporto o alla macrofase della coltivazione.

Per quanto concerne l'impianto di cogenerazione (45 kW<sub>e</sub>, 105 kW<sub>t</sub>, 20kW di perdite), se si considerano sia le emissioni del motore a combustione interna che i materiali costruttivi e ipotizzando recupero di calore pari a 0, l'impatto generato è del 12,5%.

Il risultato di un impianto realmente esistente deve essere però valutato in base all'utenza termica che utilizza il calore di scarto, alle ore reali annuali di funzionamento e alle caldaie sostituite grazie al recupero termico (ai reali impatti evitati).

L'impatto che viene evitato comporta un beneficio all'intero sistema in termini di *Resources*, vale a dire delle risorse fossili che si utilizzerebbero per produrre tale potenza termica di recupero in altro modo.

Essendo un impianto interamente ipotizzato e non avendo alcuna utenza termica reale, l'unica riflessione viene fatta sulla quantità di energia termica che deve essere recuperata per poter azzerare gli impatti (*Single point score*): 1,06 kWh<sub>t</sub> per ogni kWh<sub>e</sub> prodotto.

Lo scenario di smaltimento, essendo riferito al solo impianto di gassificazione, ha un impatto dell'1,89%.

Un dato significativo è che le emissioni di CO<sub>2</sub> per kWh<sub>e</sub> prodotto dall'impianto di gassificazione sono circa un quinto rispetto alle emissioni relative alla produzione di un kWh<sub>e</sub> in Italia (in base al mix energetico nazionale).

Dall'analisi LCA si può allora dedurre che la macrofase che grava maggiormente sul carico ambientale è quella della coltivazione (75,4%), sono quindi necessari interventi di miglioramento soprattutto nella fase agricola, specialmente riguardo ai consumi di combustibile e all'uso di concimi.

La CO<sub>2</sub> che viene emessa in atmosfera dipende unicamente dalle lavorazioni agricole e dal trasporto del cippato, visto che la CO<sub>2</sub> assorbita durante la crescita dagli alberi di pioppo è circa la stessa che poi viene emessa durante la combustione del gas di sintesi.

Non sono state fatte valutazioni in termini economici, ma si può affermare che l'investimento delle macchine agricole può essere giustificato nel caso in cui, oltre ad avere ettari adibiti a coltivazioni energetiche, si possiedono anche coltivazioni alimentari, le quali hanno periodi di lavorazione diversi rispetto a quelle energetiche e quindi compatibili con queste.



## *APPENDICE A*

---

Diagramma dell'intero sistema completo di scenario di smaltimento, metodo Eco-indicator 99, *Single score* P(t), recupero termico nullo.



## *APPENDICE B*

---

Diagramma dell'intero sistema completo di scenario di smaltimento, metodo Eco-indicator 99, *Single score* P(t), recupero termico massimo.



## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Gian Luigi Baldo, Massimo Marino, Stefano Rossi; *Analisi del ciclo di vita LCA*; Edizioni ambiente, 2008.
- [2] A. Cavallini; *Appunti del corso Energie Rinnovabili*; Padova, anno accademico 2011/2012.
- [3] Ambrosetti; *Linee guida per la politica delle fonti energetiche primarie come chiave per la competitività e sicurezza dell'Italia e dell'Europa in futuro*; Milano, 2007.
- [4] IEA International Energy Agency; *World energy outlook 2012*, Capitolo 7 *Renewable energy outlook*; 2012.
- [5] L. Bigaran; *Evoluzione della situazione energetica mondiale e italiana nell'attuale crisi economica mondiale*; Padova, anno accademico 2009/2010.
- [6] E. Tenaglia; *Indagine tecnico economica sullo stato della gassificazione da biomasse vegetali per impianti a media e bassa potenza in Italia*; Milano, 2010.
- [7] L. Loatelli; *Analisi LCA (life cycle assessment) della produzione di bioetanolo*; Padova, Anno accademico 2006/2007.
- [8] UNI EN ISO 14040; *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*; 2006.
- [9] UNI EN ISO 14044; *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*; 2006.
- [10] L. Corbella, M. Cocchi, C. Sagarese; *Produzione ed utilizzo di biomassa ligno cellulosiche da colture dedicate*; Etaflorence Renewable Energies, 2009.
- [11] L. Pari; *Polo Agricoltura Non Alimentare Colture Energetiche Alternative (P.A.N.A.C.E.A)*; Roma, 2010.
- [12] R. Spinelli, N. Magagnotti, C. Nati, R. Pretolani, M. Peri; *Raccogliamo l'energia*, Attività condotta nell'ambito del Progetto regionale EVASFO - Evaluation Short Rotation Forestry; Milano, 2004.
- [13] G. Allegro, S. Bisoffi, P. m. Chiarabaglio, D. Coaloa, G. Castro, G. Facciotto, A. Giorcelli, L. Vietto; *PIOPPICOLTURA Produzioni di qualità nel rispetto dell'ambiente*; ISP Milano, 2006.
- [14] G. Cagliero; *Volume 2 – cap. 17 Fonti rinnovabili: geotermia, biomasse, rifiuti*; Zanichelli, 2012.

- [15] R. Preto; *Biomasse e pianificazione del territorio: lo sviluppo di filiere per l'utilizzo con tecnologie innovative per la produzione di energia*; Pavia, anno accademico 2009/2010.
- [16] C. Buratti, F. Fantozzi; *L'impiego energetico delle biomasse*; Rivista bimestrale Obiettivo; Perugia, 2006.
- [17] ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente); *“Energia dalle biomasse, tecnologia a prospettive”*; Roma, 2008.
- [18] M. Fiala; *“Energia da biomasse agricole”*; Maggioli editore, 2010.
- [19] P. Quaak, H. Knoef, H. Stassen; *“Energy from Biomass: Review of Combustion and Gasification Technologies”*; The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, USA.
- [20] P. Basu; *“Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory”*; Academic Press, Burlington, USA, 2010.
- [21] SUPPLEMENTO A L'Informatore agrario; *Cantere innovativo di raccolta del pioppo a turno breve*; 2009.
- [22] SUPPLEMENTO A L'Informatore agrario; *Come migliorare il cippato attraverso lo stoccaggio*; 2009.
- [23] SUPPLEMENTO A L'Informatore agrario; *L'essiccazione naturale del cippato del pioppo*; 2009.
- [24] SUPPLEMENTO A L'Informatore agrario; *I vantaggi di stoccare il pioppo a bordo campo*; 2009.
- [25] ENEMA, Ente nazionale per la meccanizzazione agricola; *programma di sperimentazione di macchine agricole innovative*; Roma, 2010.
- [26] S. Bergante, G. Facciotto; *Arboricoltura da legno: impianti biennali, biennali, quinquennali*; Sherwood, Foreste ed Alberi Oggi, n° 128, 2006.
- [27] F. Gallucci, L. Pari, S. Croce, *Stoccaggio del cippato di pioppo*; Sherwood, Foreste ed Alberi Oggi, n° 168, 2010.
- [28] CRA-ING; *Biomasse lignocellulosiche per uso energetico*; Sherwood, Foreste ed Alberi Oggi, n°192, 2013.
- [29] M. Goedkoop, A. D. Schryver, M. Oele, S. Durksz, D. De Roest; *Introduction to LCA with SimaPro 7*; PRé, 2010.
- [30] M. Goedkoop, A. D. Schryver, M. Oele, S. Durksz, D. De Roest; *SimaPro 7 Tutorial*; PRé, 2010.

- [31] R. Frischknecht, N. Jungbluth; *SimaPro Database Manual The ETH-ESU 96 libraries*; PRé 2004.
- [32] M. Vio; *Impianti di cogenerazione*; Editoriale Delfino, 2007.
- [33] A. Hansen, A. Meyer-Aurich, A. Prochnow; *Greenhouse gas mitigation potential of a second generation energy production system from short rotation poplar in Eastern Germany and its accompanied uncertain*; Science Direct, 2013;
- [34] S. Y. Dillen; S. N. Djomo, N. Al Alfas, S. Vanbeveren, R. Ceulemans; *Biomass yield and energy balance of short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years*; Science Direct, 2013.
- [35] Avdhesh Kr. Sharma; *Experimental investigations on a 20 kW<sub>e</sub> solid biomass gasification system*; Science Direct, 2010.
- [36] J. Kern, H. J. Hellebrand, V. Scholz, B. Linke; *Assessment of nitrogen fertilization for the CO<sub>2</sub> balance during the production of poplar and rye*; Science Direct, 2010.
- [37] A. Rafaschieri, M. Rapaccini, G. Manfrida; *Life Cycle Assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels*; Pergamon, 1999;
- [38] C. P. Mitchell, E. A. Stevens, M. P. Watters; *Short-rotation forestry, Operation, productivity and costs based on experience gained in the UK*; Elsevier Science, 1999.
- [39] M. Carpentieri, A. Corti, L. Lombardi; *Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO<sub>2</sub> removal*; Science Direct, 2001.
- [40] C. M. Gasol, X. Gabarrell, A. Anton, M. Rigola, J. Carrasco, P. Ciria, J. Rieradevall; *LCA of poplar bioenergy system compared with Brassica carinata energy crop and natural gas in regional scenario*; Science Direct, 2012.
- [41] L. Wright; *Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop based projects* Energy Policy, 2002.
- [42] Y. Son, S. J. Yoon, Y. K. Kim, J. Lee; *Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier*; Science Direct, 2006.
- [43] Suraj Pandey; *Dati relativi alle caratteristiche tecniche di un gassificatore da 45 kW<sub>e</sub>*; Kathmandu University.

## *SITOGRAFIA*

---

- [1] [www.agraria.org](http://www.agraria.org)
- [2] [www.maschionet.com](http://www.maschionet.com)
- [3] [www.caseih.com/it\\_it/Products/Tractors](http://www.caseih.com/it_it/Products/Tractors)
- [4] [www.isprambiente.gov.it/it](http://www.isprambiente.gov.it/it)
- [5] [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [6] [www.mdpi.com](http://www.mdpi.com)
- [7] [www.caemaenergia.com](http://www.caemaenergia.com)
- [8] [www.pre-sustainability.com](http://www.pre-sustainability.com)
- [9] [www.venetoagricoltura.org](http://www.venetoagricoltura.org)